



TRABALHO DE GRADUAÇÃO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ANÁLISE DA CARACTERÍSTICA MHO DINÂMICA DA  
PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA DE LINHAS DE  
TRANSMISSÃO

**VITOR ELIAS CESTE SILVA**

**UNIVERSIDADE DE BRASILIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

Universidade de Brasília  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Elétrica

## Análise da Característica Mho Dinâmica da Proteção de Distância de Linhas de Transmissão

Vitor Elias Cesse Silva

Trabalho final de graduação submetido ao Departamento de engenharia Elétrica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

### **APROVADA POR:**

---

Prof. Kleber Melo e Silva, DSc. (ENE-UNB)  
(Orientador)

---

Prof. Felipe Vigolvino Lopes, DSc. (ENE-UnB)  
(Examinador Interno)

---

Bernard Fernandes Küsel, MSc. (ONS)  
(Examinador Externo)

**Brasília/DF, Dezembro de 2016.**

*Ao meu pai Francisco, à minha mãe Sandra e ao  
meu irmão Felipe, DEDICO.*

Neste trabalho, realiza-se um estudo da proteção de distância de linhas de transmissão com foco no comportamento dinâmico das características mho polarizadas por memória de tensão de sequência positiva em um relé numérico microprocessado. Procura-se deduzir analiticamente as expressões dos vetores de expansão e de alcance para diferentes tipos de faltas incidentes na linha tanto reversas quanto à frente do terminal do relé, sendo que tais vetores delimitam o diâmetro da característica mho de operação do relé.

Com esse objetivo, realiza-se previamente uma revisão dos principais conceitos da proteção de distância, de maneira a auxiliar na compreensão das deduções e análises da característica mho dinâmica. Em seguida, apresentam-se os cálculos referentes aos vetores de alcance e de expansão em cada tipo de falta analisado.

Por fim, são apresentadas análises e avaliações de desempenho da característica mho polarizada por memória de tensão de sequência positiva frente ao desempenho da característica mho autopolarizada, explorando-se diferentes localizações e tipos de falta.

Palavras-chave: Proteção de distância, linhas de transmissão, característica mho dinâmica.

---

## ABSTRACT

In this work, a study on distance protection of transmission lines with a special focus on the dynamic behavior of the positive sequence memory polarized mho characteristic on a numerical relay is performed. The expressions of expansion and reach vectors are derived for each different type of fault, either forward or reverse, on the transmission lines. These vectors are responsible for defining the expansive behavior of mho characteristics during a fault.

Firstly, a review on the key concepts of distance protection is performed, so that it helps the proper understanding on the study and analysis of the dynamic mho characteristic. After that, all the calculations of the expansion and reach vectors for each type of fault analyzed are presented.

Finally, the analysis and evaluations on the performance of positive sequence memory polarized mho characteristic are presented and then compared to the autopolarized characteristic performance for each different type of fault.

Keywords: Distance protection, transmission line, dynamic mho characteristic.

# SUMÁRIO

<b>Capítulo 1 - Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 Contextualização do tema.....	1
1.2 Objetivos do trabalho.....	2
1.3 Organização do texto .....	3
 <b>Capítulo 2 - Fundamentos da proteção de distância .....</b>	<b>4</b>
2.1 Cálculo da impedância de falta .....	6
2.2 Diagrama R-X e as características de operação .....	13
2.3 Zonas de proteção de distância .....	14
2.4 Comparadores.....	15
2.4.1 Comparador de fase .....	16
2.4.2 Comparador de magnitude .....	18
2.4.3 Comparador mho proposto por Schweitzer & Roberts (1993) .....	19
2.5 Polarização nas características mho .....	21
2.5.1 Característica mho autopolarizada .....	22
2.5.2 Característica mho polarizada .....	22
2.5.2.1 Polarização cruzada.....	22
2.5.2.2 Polarização por memória de tensão .....	24
 <b>Capítulo 3 - Característica de distância mho dinâmica.....</b>	<b>26</b>
3.1 Sistema analisado .....	27
3.2 Falta trifásica .....	27
3.3 Falta bifásica.....	32
3.4 Falta monofásica.....	42
3.5 Falta bifásica-terra .....	48
3.6 Resumo.....	54

<b>Capítulo 4 - Apresentação e análise dos resultados .....</b>	<b>55</b>
4.1 Sistema analisado .....	55
4.2 Tipos de faltas analisadas .....	57
4.3 Influência da localização da falta.....	57
4.4 Comparadores implementados.....	59
4.5 Influência do filtro de memória de tensão.....	60
4.6 Avaliação de desempenho da característica mho polarizada por memória de sequência positiva .....	63
4.6.1 Falta bifásica-terra .....	63
4.6.2 Falta bifásica .....	65
4.6.3 Falta monofásica .....	67
4.7 Avaliação da acomodação de resistência de falta nas características mho dinâmicas .....	68
4.8 Efeitos da variação do fluxo de carga .....	70
 <b>Capítulo 5 - Conclusões e propostas para trabalhos futuros.....</b>	 <b>72</b>
 <b>Referências bibliográficas.....</b>	 <b>75</b>

# LISTA DE FIGURAS

2.1. Diagrama unifilar de um circuito trifásico com uma falta aplicada no ponto F..	7
2.2. Circuitos de sequência para uma falta bifásica entre as fases B e C.	7
2.3. Circuitos de sequência para uma falta bifásica-terra entre as fases B e C.	9
2.4. Circuito de sequência para uma falta trifásica.	9
2.5. Circuitos de sequência para uma falta monofásica na fase A.	10
2.6. Diagrama R-X (SILVA, 2009).	13
2.7. Tipos de características de operação do relé de distância: (a) Impedância; (b) Mho; (c) Lenticular; (d) Retângulo; (e) Blinder; (f) Reatância; (g) Resistência.	13
2.8. Representação das zonas de proteção de distância (SILVA, 2009).	14
2.9. Representação das zonas de proteção de distância no diagrama R-X.	15
2.10. Representação da característica mho no plano R-X (SILVA, 2009).	16
2.11. Relação entre as fases de $Z_{op}$ e $Z_{pol}$ para o caso de $Z_R$ : (a) dentro da característica mho; (b) sobre a característica mho; (c) fora da característica mho.	18
2.12. Relação entre as magnitudes de $Z_{op}$ e $Z_{pol}$ para o caso de $Z_R$ : (a) dentro da característica mho; (b) sobre a característica mho; (c) fora da característica mho (SILVA, 2009).	19
2.13. Característica mho no plano RI-XI.	20
2.14. Tensão de suplementação para a tensão: (a) $V_a$ (falta fase-terra); (b) $V_{bc}$ (falta fase-fase).	23
2.15. Característica mho polarizada: (a) falta na direção direta; (b) falta na direção reversa (SILVA, 2009).	25
3.1. Circulo definido por vetores <b>a</b> e <b>b</b> arbitrários no plano R-X.	26
3.2. Circuito de sequência para uma falta trifásica à frente.	28
3.3. Característica mho dinâmica durante faltas trifásicas à frente (expansão máxima) (FENTIE, 2016).	29
3.4. Característica mho dinâmica durante faltas trifásicas (regime permanente) (CALERO, 2009).	27
3.5. Circuito de sequência para uma falta trifásica reversa.	30
3.6. Característica mho dinâmica durante falta trifásica reversa.	32
3.7. Circuitos de sequência para uma falta bifásica BC à frente.	33



3.8. Característica mho dinâmica durante faltas bifásicas à frente (CALERO, 2009). .....	35
3.9. Característica mho dinâmica das unidades de impedância $Z_{AB}$ , $Z_{BC}$ e $Z_{CA}$ , durante uma falta bifásica à frente entre as fases B e C (regime permanente). .....	39
3.10. Circuitos de sequência para uma falta bifásica BC reversa. ....	39
3.11. Característica mho dinâmica durante falta bifásica reversa. ....	41
3.12. Circuitos de sequência para uma falta monofásica na fase A à frente. ....	42
3.13. Característica mho dinâmica durante falta fase-terra (CALERO, 2009). ....	44
3.14. Circuitos de sequência para uma falta monofásica na fase A reversa. ....	45
3.15. Característica mho dinâmica durante falta monofásica reversa. ....	47
3.16. Circuitos de sequência para uma falta bifásica-terra BCT à frente. ....	48
3.17. Circuitos de sequência para uma falta bifásica-terra BCT reversa. ....	51
3.18. Característica mho dinâmica durante falta bifásica-terra reversa. ....	53
4.1. Sistema Analisado. ....	55
4.2. Saída dos comparadores de fase durante falta trifásica à frente em 50% da linha a ser protegida: (a) comparador polarizado por memória de tensão de sequência positiva; (b) comparador autopolarizado. ....	57
4.3. Saída do comparador de fase autopolarizado durante falta trifásica em 1% da linha protegida. ....	58
4.4. Saída dos comparadores polarizados por memória de tensão de sequência positiva durante falta trifásica em 1% da linha protegida: (a) comparador de fase; (b) comparador proposto por Schweitzer & Roberts. ....	59
4.5. Efeito do filtro de memória na tensão de sequência positiva durante falta trifásica. ....	61
4.6. Saída dos comparadores de fase durante falta trifásica reversa em 99% da linha de transmissão adjacente: (a) comparador polarizado por memória de tensão de sequência positiva; (b) comparador autopolarizado. ....	61
4.7. Saída dos comparadores de fase em regime permanente de falta trifásica reversa, em 99% da linha de transmissão adjacente: (a) comparador polarizado por memória de tensão de sequência positiva; (b) comparador autopolarizado. ....	62
4.8. Saída dos comparadores propostos por Schweitzer & Roberts durante uma falta bifásica-terra BCT em 1% da linha protegida: (a) detalhe da região de operação do comparador polarizado; (b) detalhe da região de operação do comparador autopolarizado. ....	63
4.9. Saída dos comparadores propostos por Schweitzer & Roberts durante falta bifásica-terra BCT reversa em 99% da linha de transmissão adjacente: (a) detalhe da região de operação do comparador polarizado; (b) detalhe da região de operação do comparador autopolarizado. ....	64
4.10. Saída dos comparadores propostos por Schweitzer & Roberts durante uma falta bifásica BC em 1% da linha protegida: (a) detalhe da região de operação do comparador polarizado; (b) detalhe da região de operação do comparador autopolarizado. ....	65
4.11. Saída dos comparadores propostos por Schweitzer & Roberts durante uma falta bifásica BC em 99% da linha adjacente: (a) detalhe da região de operação do comparador polarizado; (b) detalhe da região de operação do comparador autopolarizado. ....	66

4.12. Saída dos comparadores de fase durante uma falta monofásica AT em 1% da linha protegida: (a) comparador polarizado por memória de tensão de sequência positiva; (b) comparador autopolarizado.....	67
4.13. Saída dos comparadores de fase durante uma falta monofásica AT em 99% da linha adjacente: (a) comparador polarizado por memória de tensão de sequência positiva; (b) comparador autopolarizado.....	68
4.14. Saída dos comparadores de fase durante uma falta monofásica AT em 2% da linha de transmissão protegida com resistência de falta de $10\Omega$ : (a) comparador polarizado por memória de tensão de sequência positiva; (b) comparador autopolarizado. ....	68
4.15. Saída dos comparadores de fase durante uma falta monofásica AT em 2% da linha de transmissão protegida com resistência de falta de $50\Omega$ : (a) comparador polarizado por memória de tensão de sequência positiva; (b) comparador autopolarizado. ....	69
4.16. Saída dos comparadores de fase durante uma falta monofásica AT em 2% da linha de transmissão protegida com resistência de falta de $100\Omega$ : (a) comparador polarizado por memória de tensão de sequência positiva; (b) comparador autopolarizado. ....	69
4.17. Saída do comparador de fase polarizado por memória de tensão de sequência positiva durante uma falta monofásica AT em 2% da linha de transmissão protegida para diferentes ângulos de tensão da fonte local: (a) $20^\circ$ ; (b) $40^\circ$ ; (c) $60^\circ$ ; (d) $80^\circ$ .....	71

# LISTA DE TABELAS

2.1. Sinais de entrada para unidades fase-terra e fase-fase do relé de distância. ....	12
2.2. Unidades do relé que devem operar para cada tipo de falta. ....	12
2.3. Tensão de suplementação das unidades fase-terra e fase-fase do relé de distância. ....	24
3.1. Resumo das deduções analíticas. ....	54
4.1. Modelo do sistema elétrico utilizado na simulação de faltas. ....	56

# LISTA DE SÍMBOLOS

$\hat{V}_a$	Fasor da tensão na fase A.
$\hat{V}_b$	Fasor da tensão na fase B.
$\hat{V}_c$	Fasor da tensão na fase C.
$\hat{V}_{ab}$	Fasor da tensão entre as fases A e B.
$\hat{V}_{bc}$	Fasor da tensão entre as fases B e C.
$\hat{V}_{ca}$	Fasor da tensão entre as fases C e A.
$\hat{I}_a$	Fasor da corrente na fase A.
$\hat{I}_b$	Fasor da corrente na fase B.
$\hat{I}_c$	Fasor da corrente na fase C.
$S_O$	Sinal de operação do comparador de magnitude.
$S_R$	Sinal de restrição do comparador de magnitude.
$S_M$	Sinal de medição do comparador de fase.
$S_P$	Sinal de polarização do comparador de fase.
$\hat{V}_R$	Fasor da tensão vista pelo relé.
$\hat{V}_{F1}$	Fasor da tensão de sequência positiva no ponto F onde ocorreu a falta.
$\hat{V}_{F2}$	Fasor da tensão de sequência negativa no ponto F onde ocorreu a falta.
$\hat{V}_{F0}$	Fasor da tensão de sequência zero no ponto F onde ocorreu a falta.

$\hat{V}_{R1}$	Fasor da tensão de sequência positiva vista pelo relé.
$\hat{V}_{R2}$	Fasor da tensão de sequência negativa vista pelo relé.
$\hat{V}_{R0}$	Fasor da tensão de sequência zero vista pelo relé.
$\hat{V}_{Ra}$	Fasor da tensão na fase A do sistema vista pelo relé.
$\hat{V}_{Rb}$	Fasor da tensão na fase B do sistema vista pelo relé.
$\hat{V}_{Rc}$	Fasor da tensão na fase C do sistema vista pelo relé.
$\hat{V}_{\min}$	Fasor da tensão mínima de operação do sistema.
$\hat{V}_{\sup}$	Fasor da tensão de suplementação da tensão de falta.
$\hat{V}_{\text{pre}}$	Fasor da tensão de pré-falta.
$\hat{V}_{\text{op}}$	Fasor da tensão de operação dos comparadores que implementam a característica mho de operação do relé.
$\hat{V}_{\text{pol}}$	Fasor da tensão de polarização dos comparadores que implementam a característica mho de operação do relé.
$\hat{E}_S$	Fonte de tensão do equivalente de Thévenin S.
$\hat{E}_U$	Fonte de tensão do equivalente de Thévenin U.
$\hat{I}_R$	Fasor da corrente vista pelo relé.
$\hat{I}_{R1}$	Fasor da corrente de sequência positiva vista pelo relé.
$\hat{I}_{R2}$	Fasor da corrente de sequência negativa vista pelo relé.
$\hat{I}_{R0}$	Fasor da corrente de sequência zero vista pelo relé.
$\hat{I}_{Ra}$	Fasor da corrente na fase A do sistema vista pelo relé.
$\hat{I}_{Rb}$	Fasor da corrente na fase B do sistema vista pelo relé.
$\hat{I}_{Rc}$	Fasor da corrente na fase C do sistema vista pelo relé.
$\hat{I}'_{Ra}$	Fasor da corrente compensada na fase A do sistema vista pelo relé.

$\hat{I}_{Rb}$	Fasor da corrente compensada na fase B do sistema vista pelo relé.
$\hat{I}_{Rc}$	Fasor da corrente compensada na fase C do sistema vista pelo relé.
$Z_R$	Impedância aparente vista pelo relé.
$r_R$	Parte real da impedância aparente vista pelo relé.
$x_R$	Parte Imaginária da impedância aparente vista pelo relé.
$Z_{L1}$	Impedância de sequência positiva da linha de transmissão.
$Z_{L0}$	Impedância de sequência zero da linha de transmissão.
$Z_{R1}$	Impedância de sequência positiva fonte remota.
$Z_{R0}$	Impedância de sequência zero fonte remota.
$r_{L1}$	Parte real da impedância de sequência positiva da linha de transmissão.
$x_{L1}$	Parte imaginária da impedância de sequência positiva da linha de transmissão.
$Z_{S1}$	Impedância de sequência positiva do equivalente de Thévenin S.
$Z_{S2}$	Impedância de sequência negativa do equivalente de Thévenin S.
$Z_{S0}$	Impedância de sequência zero do equivalente de Thévenin S.
$Z_{U1}$	Impedância de sequência positiva do equivalente de Thévenin U.
$Z_{U2}$	Impedância de sequência negativa do equivalente de Thévenin U.
$Z_{U0}$	Impedância de sequência zero do equivalente de Thévenin U.
$z_{L1}$	Impedância de sequência positiva por unidade de comprimento da linha de transmissão.
$z_{L2}$	Impedância de sequência negativa por unidade de comprimento da linha de transmissão.
$z_{L0}$	Impedância de sequência zero por unidade de comprimento da linha de transmissão.
$Z_{AT}$	Unidade de impedância do relé para faltas que envolvam a fase A do sistema.

$Z_{BT}$	Unidade de impedância do relé para faltas que envolvam a fase B do sistema.
$Z_{CT}$	Unidade de impedância do relé para faltas que envolvam a fase C do sistema.
$Z_{AB}$	Unidade de impedância do relé para faltas que envolvam as fases A e B do sistema.
$Z_{BC}$	Unidade de impedância do relé para faltas que envolvam as fases B e C do sistema.
$Z_{CA}$	Unidade de impedância do relé para faltas que envolvam as fases C e A do sistema.
$Z_{pol}$	Impedância de polarização dos comparadores que implementam a característica de operação do relé.
$Z_A$	Impedância de alcance da zona de proteção.
$h$	Porcentagem do comprimento total da linha onde ocorreu a falta.
$K_0$	Fator de compensação de sequência zero.
$k_p$	Porcentagem de suplementação da tensão de falta.
$\theta_R$	Ângulo da impedância aparente vista pelo relé.
$\theta_{L1}$	Ângulo da impedância de sequência positiva da linha de transmissão.
$\emptyset$	Diferença das fases dos fasores $\hat{V}_{op}$ e $\hat{V}_{pol}$ no comparador de fase do relé.
$T_2$	Tempo de atraso da atuação da segunda zona de proteção do relé.
$T_3$	Tempo de atraso da atuação da terceira zona de proteção do relé.
$S_1$	Sinal de operação implementado no comparador de fase da característica mho de operação do relé.
$S_2$	Sinal de polarização implementado no comparador de fase da característica mho de operação do relé.
$\bar{a}$	Vetor da impedância de alcance da característica mho dinâmica.
$\bar{b}$	Vetor de expansão da característica mho dinâmica.
$\bar{b}_{mem}$	Vetor de expansão memorizado da característica mho dinâmica.

$Z$	Impedância calculada pelo relé.
$\hat{I}_1$	Fasor da corrente de sequência positiva medida pelo relé utilizada nas deduções analíticas.
$\hat{I}_2$	Fasor da corrente de sequência negativa medida pelo relé utilizada nas deduções analíticas.
$\hat{I}_0$	Fasor da corrente de sequência zero medida pelo relé utilizada nas deduções analíticas.
$\hat{V}_{1mem}$	Fasor de tensão de sequência positiva memorizada utilizada nas deduções analíticas.
$\hat{V}_1$	Fasor de tensão de sequência positiva medida pelo relé utilizada nas deduções analíticas.
$\hat{V}_2$	Fasor de tensão de sequência negativa medida pelo relé utilizada nas deduções analíticas.
$\hat{V}_0$	Fasor de tensão de sequência zero medida pelo relé utilizada nas deduções analíticas.



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Atualmente, a energia elétrica é um bem indispensável na vida da civilização. Ao longo do último século, desenvolveram-se inúmeras aplicações para este recurso em virtude dos grandes avanços tecnológicos. De modo que se fez necessário a elaboração dos primeiros sistemas de proteção a fim de se garantir a continuidade e segurança do fornecimento de energia elétrica.

Para que a energia elétrica chegue ao seu consumidor final, demanda-se uma sequência de processos. O primeiro deles consiste na geração de energia elétrica a partir de determinada técnica de conversão de energia. Em seguida, tem-se a transmissão da energia produzida através de linhas de alta potência até os centros consumidores. Por último, o sistema de distribuição se encarrega de conectar o sistema de transmissão, ou até mesmo unidades geradoras de pequeno e médio porte, aos consumidores finais.

Dentro desse sistema, têm-se as linhas de transmissão como elementos extremamente susceptíveis à incidência de defeitos das mais diversas naturezas, tais como: vandalismos, descargas atmosféricas, defeitos que motivam curtos-circuitos, queimadas e vendavais. Para minimizar os efeitos desses eventos, as linhas de transmissão são protegidas ao longo do seu percurso e nas duas extremidades pelos seguintes dispositivos (FILHO; MAMEDE, 2014):

- Cabos-guarda, posicionados na parte superior das torres.
- Para-raios de sobretensão contra ondas incidentes oriundas de descargas atmosféricas ou surtos do seu percurso.
- Disjuntores associados a relés de proteção contra sobrecorrente e sobretensões.

As linhas de transmissão podem ser classificadas quanto aos níveis de tensão. Os Procedimentos de Rede, documento elaborado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), consideram linhas de transmissão aquelas cujas tensões são de 230, 345, 500 kV e acima que compõem a Rede Básica do Sistema Interligado Nacional (SIN). Os procedimentos de rede do ONS estabelecem que o tempo total para eliminação de faltas, incluindo o tempo de abertura dos disjuntores de todos os

terminais das linhas de transmissão, não deve exceder a 100 ms para linhas com tensão nominal igual ou superior a 345 kV, enquanto que para linhas com tensão nominal inferior a este valor, o tempo total de extinção da falta não deve exceder a 150 ms (ONS, 2011).

O tipo de proteção mais empregado em linhas de transmissão é a proteção de distância. Tal proteção baseia-se na utilização da distância, obtida de forma indireta por meio do cálculo da impedância de sequência positiva do trecho de linha entre o relé e a localização da falta, comparando-a com sua característica de operação (ZIEGLER, 2006).

O desenvolvimento da tecnologia digital permitiu que os princípios da proteção de distância pudessem ser implementados nos relés digitais, tornando os sistemas de proteção mais rápidos, flexíveis e confiáveis (REBIZANT, 2011). Dentro das diversas características de operação existentes na proteção de distância, a característica mho é muito utilizada na proteção de linhas de transmissão (FENTIE, 2016). Em conjunto com uma técnica de polarização adequada, a característica mho pode apresentar significativa melhora na detecção de faltas, principalmente com relação a faltas trifásicas próximas ao terminal do relé.

Devido às inúmeras formas existentes de implementação da característica mho, faz-se necessário um estudo detalhado de sua operação, a fim de se compreender as técnicas que auxiliam no desempenho da proteção de distância. Embora a utilização de características dinâmicas seja consolidada, o entendimento matemático que descreve o seu comportamento não é trivial.

## **1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO**

Este trabalho tem como principal objetivo analisar o comportamento dinâmico da característica mho polarizada por memória de tensão de sequência positiva, que apresenta propriedades expansivas desejáveis na detecção de diversos tipos de falta, para isso, apresentam-se as deduções que descrevem o comportamento da característica dinâmica em regime permanente de falta, além de se realizar uma avaliação de

desempenho da característica polarizada por memória de tensão de sequência positiva frente à característica autopolarizada. Esta última, por sua vez, apresenta uma característica mho de operação estática.

Com relação aos objetivos específicos, têm-se os seguintes:

- Realizar uma revisão dos fundamentos da proteção de distância
- Deduzir os vetores de expansão da característica mho dinâmica para diversos tipos de faltas na linha de transmissão, tanto à frente do terminal do relé, dentro da linha protegida, quanto reversa, fora da linha protegida.
- Analisar o desempenho na detecção de faltas próximas ao terminal do relé quando utilizada polarização por memória de tensão de sequência positiva.

### **1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO**

O presente trabalho apresenta suas respectivas estruturas organizadas da seguinte forma:

- No Capítulo 2, abordam-se os conceitos da proteção de distância de linhas de transmissão;
- No Capítulo 3, apresentam-se as deduções obtidas para os vetores de expansão das características mho dinâmica para diversas faltas analisadas.
- No Capítulo 4, apresentam-se os resultados obtidos com as saídas dos comparadores de fase utilizados na característica mho polarizada por memória de tensão de sequência positiva e autopolarizada.
- Por último, as conclusões e propostas para trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 5.

## **2 FUNDAMENTOS DA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA**

Durante a operação dos sistemas elétricos de potência ocorrem, frequentemente, falhas nos seus elementos que resultam em interrupções no fornecimento de energia elétrica aos consumidores conectados a esses sistemas, com a consequente redução da qualidade dos serviços prestados.

A principal função de um sistema de proteção é assegurar a desconexão de todo sistema elétrico submetido a qualquer anormalidade que o faça operar fora dos limites previstos ou de parte dele. Em segundo lugar, o sistema de proteção tem a função de fornecer as informações necessárias aos responsáveis por sua operação, de modo a facilitar a identificação dos defeitos e a sua consequente recuperação.

Os critérios utilizados na detecção de um defeito em um sistema elétrico são os seguintes (FILHO; MAMEDE, 2014):

- Elevação de corrente.
- Elevação e redução da tensão.
- Inversão do sentido da corrente.
- Alteração da impedância do sistema.
- Comparação de módulo e ângulo de fase na entrada e na saída do sistema.

O bom desempenho de um projeto de proteção depende de alguns requisitos básicos. São eles (ANDERSON, 1999):

- Sensibilidade: capacidade do elemento de proteção reconhecer com precisão a faixa e os valores ajustados para sua operação;
- Confiabilidade: habilidade de cumprir corretamente as funções que lhe foram confiadas;
- Segurança: habilidade de evitar operações indevidas;
- Seletividade: técnica pela qual somente o elemento de proteção mais próximo da falta desconecta o trecho defeituoso do sistema;
- Coordenação: consiste da determinação dos ajustes apropriados do sistema de proteção, a fim de se obter seletividade em sua operação;

- Velocidade: é a característica voltada para reduzir o tempo de duração da falta, para um mínimo de danos no sistema protegido;
- Economia: consiste em se garantir a melhor proteção possível ao menor custo possível;
- Simplicidade: característica que considera a utilização mínima dos equipamentos e circuitos na execução da proteção;
- Manutenibilidade: capacidade de permitir manutenção rápida e precisa, reduzindo-se ao mínimo os custos de manutenção e o tempo durante o qual o sistema fica fora de serviço.

Os relés constituem um dos principais elementos de proteção dos sistemas de potência. Eles são responsáveis por atuar sobre o equipamento responsável pela desconexão do trecho do circuito defeituoso, geralmente um disjuntor.

Existem, atualmente, três tipos de relés disponíveis no mercado, são eles: relés eletromecânicos, relés eletrônicos e relés digitais. Os primeiros relés a serem fabricados foram os eletromecânicos. Eles são dotados de bobinas, molas, contatos fixos e móveis que se utilizam da interação dos campos magnéticos para operar. Já os relés eletrônicos, também conhecidos como estáticos, são constituídos por componentes eletrônicos fabricados a partir de materiais semicondutores. Por último, devido ao grande avanço da microeletrônica, surgiram os relés de proteção digitais. Tais dispositivos foram capazes de incorporar, além das funções de proteção propriamente ditas, funções de comunicação, medidas elétricas, controle, sinalização remota e acesso remoto (FILHO; MAMEDE, 2014).

Dentro de um sistema elétrico, as linhas de transmissão são os elementos que mais estão sujeitos a acidentes, podendo estes por sua vez, causar defeitos temporários ou até mesmo permanentes. Diversas são as funções de proteção utilizadas nos terminais da linha de transmissão, dentre as quais, as mais utilizadas são: direcional, sobrecorrente, subtensão e distância (FILHO; MAMEDE, 2014).

Considerando as funções de proteção mais utilizadas em linhas de transmissão, a mais empregada é a proteção de distância. Ela recebe essa denominação por operar baseada na medição da distância até o local da falta, obtida indiretamente a partir da medição da impedância de sequência positiva do trecho da linha entre o relé e o local da falta (SILVA, 2009).

A preferência pela utilização da proteção de distância em linhas de transmissão, em detrimento das demais, se deve pelas seguintes vantagens (ELMORE, 2003):

- Maior cobertura para atuação instantânea;
- Maior sensibilidade, já que os relés de sobrecorrente devem ser ajustados para pelo menos duas vezes a corrente de carga;
- Coordenação e parametrização mais simples;
- Zonas de proteção fixas, praticamente independente de variações no sistema.

## 2.1 CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA DE FALTA

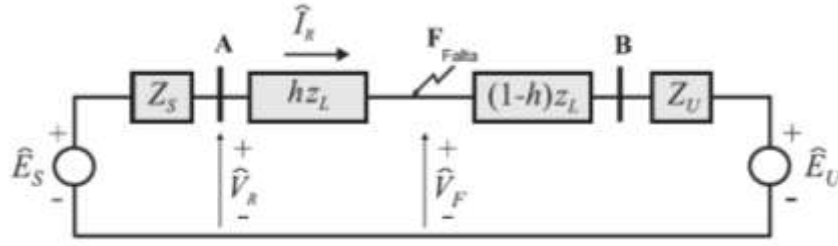
A filosofia por trás da proteção de distância está no cálculo da impedância aparente da linha através das medições dos níveis de tensão ( $\hat{V}_R$ ) e corrente ( $\hat{I}_R$ ) pelo relé. Durante a ocorrência de uma falta nas linhas de transmissão, produz-se um aumento nos níveis de corrente e redução nos níveis de tensão. Uma vez que a impedância medida pelo relé é dada por  $Z_R = \hat{V}_R / \hat{I}_R$ , tem-se uma diminuição da impedância aparente na ocasião de uma falta. Dessa forma, quanto mais próxima a falta estiver do relé, menor será o valor da impedância aparente.

Existem unidades de proteção nos relés responsáveis por monitorar continuamente o valor dessas impedâncias para os diversos tipos de falta, sendo elas envolvendo apenas fases ou envolvendo fase(s) e terra. Um aspecto importante na concepção da proteção de distância consiste em selecionar os sinais de tensão e corrente medidos pelo relé de modo que, nas condições de qualquer tipo de curto-circuito franco, a impedância medida por alguma das unidades seja igual à impedância de sequência positiva entre a localização do relé e o ponto de falta (COOK, 1985).

A impedância de sequência positiva é distribuída e considerada constante por unidade de comprimento, de tal forma que opta-se pela medição dela. Seu valor depende das características dos condutores e de suas disposições geométricas, além de ser comum a todos os tipos de falta e não ser função da resistividade do solo, como é o caso da impedância de sequência zero (SILVA, 2009).

O diagrama unifilar de um sistema elétrico trifásico presente na Figura 2.1, será o ponto de partida para a identificação de quais sinais devem ser utilizados em cada uma

das unidades de impedância do relé. Por simplicidade, considera-se que os equivalentes em cada terminal da linha de transmissão sejam iguais.

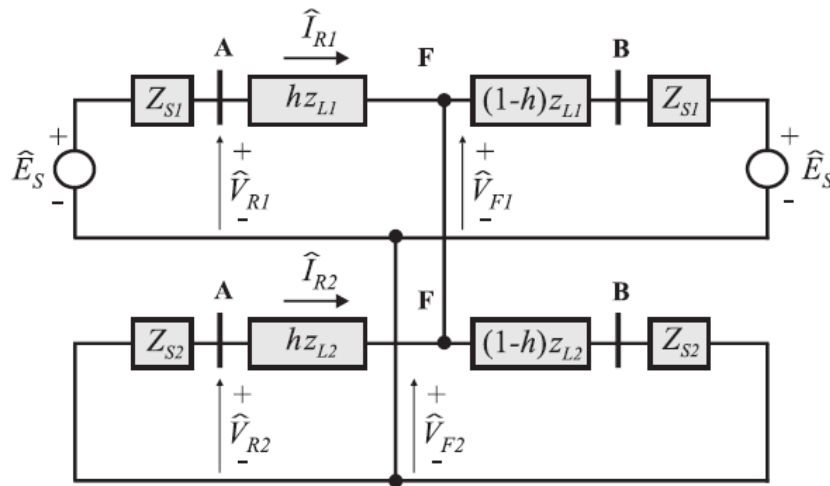


**Figura 2.1.** Diagrama unifilar de um circuito trifásico com uma falta aplicada no ponto F.

A análise do caso de uma falta bifásica entre as fases B e C localizada a uma porcentagem  $h$  do comprimento total da linha, pode ser realizada a partir da interligação dos circuitos de sequência, conforme ilustrado na Figura 2.2. Assume-se que o relé de distância esteja instalado no terminal A da linha. Analisando-se o circuito, nota-se que as tensões de sequência positiva  $\hat{V}_{F1}$  e negativa  $\hat{V}_{F2}$  no ponto de localização da falta, são iguais, de modo que:

$$\hat{V}_{F1} = \hat{V}_{F2} = \hat{V}_{R1} - h z_{L1} \hat{I}_{R1} = \hat{V}_{R2} - h z_{L2} \hat{I}_{R2}, \quad (2.1)$$

onde  $\hat{V}_{R1}$  e  $\hat{V}_{R2}$  são, respectivamente, os fasores das tensões de sequência positiva e negativa vistas pelo relé;  $z_{L1}$  e  $z_{L2}$  são, respectivamente, as impedâncias de sequência positiva e negativa por unidade de comprimento da linha de transmissão; e  $\hat{I}_{R1}$  e  $\hat{I}_{R2}$ , são respectivamente, os fasores de correntes de sequência positiva e negativa vistas pelo relé.



**Figura 2.2.** Circuitos de sequência para uma falta bifásica entre as fases B e C.

Assumindo que as impedâncias de sequência positiva e negativa por unidade de comprimento da linha de transmissão sejam iguais ( $z_{L1} = z_{L2}$ ), e, a partir da Equação 2.1, é possível calcular a impedância de sequência positiva do trecho da linha entre o relé e o local da falta em função das grandezas de sequência como:

$$hz_{L1} = \frac{\hat{V}_{R1} - \hat{V}_{R2}}{\hat{I}_{R1} - \hat{I}_{R2}}. \quad (2.2)$$

A partir da transformação em componentes simétricas, observam-se as seguintes relações entre as grandezas de fase e de sequência do sistema:

$$\hat{V}_{Rb} = \hat{V}_{R0} + a^2 \hat{V}_{R1} + a \hat{V}_{R2}, \quad (2.3a)$$

$$\hat{V}_{Rc} = \hat{V}_{R0} + a \hat{V}_{R1} + a^2 \hat{V}_{R2}, \quad (2.3b)$$

$$\hat{I}_{Rb} = \hat{I}_{R0} + a^2 \hat{I}_{R1} + a \hat{I}_{R2}, \quad (2.3c)$$

$$\hat{I}_{Rc} = \hat{I}_{R0} + a \hat{I}_{R1} + a^2 \hat{I}_{R2}, \quad (2.3d)$$

sendo  $a = 1 \angle 120^\circ$ .

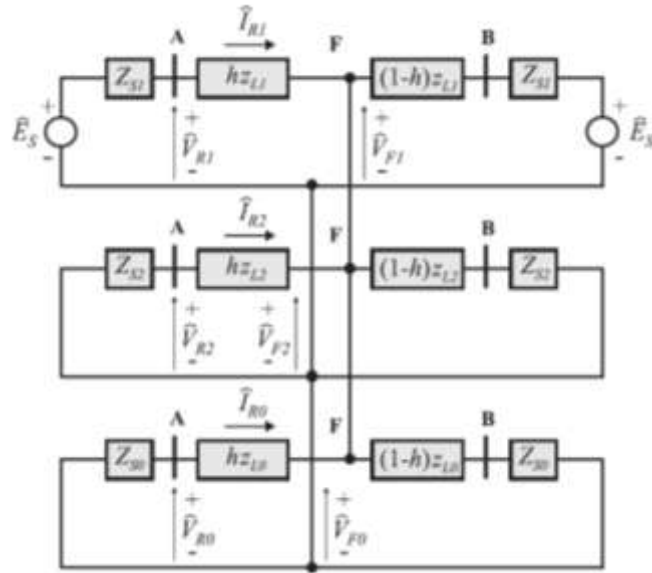
Manipulando-se as expressões acima, é possível obter que:

$$hz_{L1} = \frac{\hat{V}_{Rb} - \hat{V}_{Rc}}{\hat{I}_{Rb} - \hat{I}_{Rc}}. \quad (2.4)$$

A partir da Equação 2.4, é possível verificar que para se calcular devidamente a impedância de sequência positiva do trecho da linha entre o relé e o local da falta, é preciso se utilizar da diferença dos sinais de tensão entre as fases B e C, bem como a diferença entre os sinais de corrente das fases B e C. Analogamente, é possível obter expressões para o cálculo da impedância de sequência positiva vista pelo relé para os dois outros tipos de faltas bifásicas, como sendo a razão entre as diferenças das tensões e correntes nas fases envolvidas na falta. Dessa forma, determinam-se as três unidades de impedância do tipo bifásica do relé de distância:  $Z_{AB}$ ,  $Z_{BC}$  e  $Z_{CA}$ .

No caso das faltas bifásicas para terra, envolvendo as fases B e C, tem-se o seguinte circuito de componentes simétricas, mostrado na Figura 2.3.

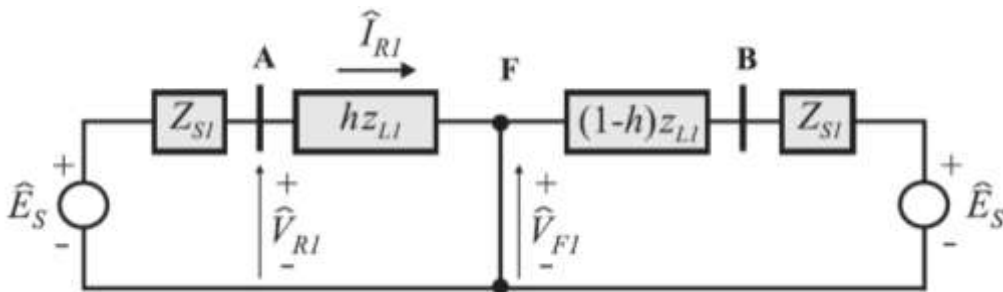




**Figura 2.3.** Circuitos de sequência para uma falta bifásica-terra entre as fases B e C.

Sendo a relação entre as tensões de sequência positiva e negativa no terminal A idêntica ao do modelo de falta bifásica apresentado anteriormente, tem-se que, para as faltas bifásicas-terra, a impedância de sequência positiva do trecho de linha entre o relé e a falta pode também ser dada pela expressão indicada na Equação 2.4.

Com relação à análise das faltas trifásicas, considera-se apenas o circuito de sequência positiva, conforme indicado na Figura 2.4.



**Figura 2.4.** Circuito de sequência para uma falta trifásica.

A partir do circuito da Figura 2.4, pode-se deduzir a expressão da impedância de sequência positiva do trecho de linha entre a falta e o terminal do relé em termos dos sinais de tensão e corrente no terminal do relé. Conforme indicado a seguir:

$$\hat{V}_{R1} = \hat{V}_{Ra} = hz_{L1}\hat{I}_{R1} = hz_{L1}\hat{I}_{Ra}, \quad (2.5a)$$

$$\hat{V}_{R2} = \hat{V}_{R0} = 0, \quad (2.5b)$$

$$\hat{I}_{R2} = \hat{I}_{R0} = 0. \quad (2.5c)$$

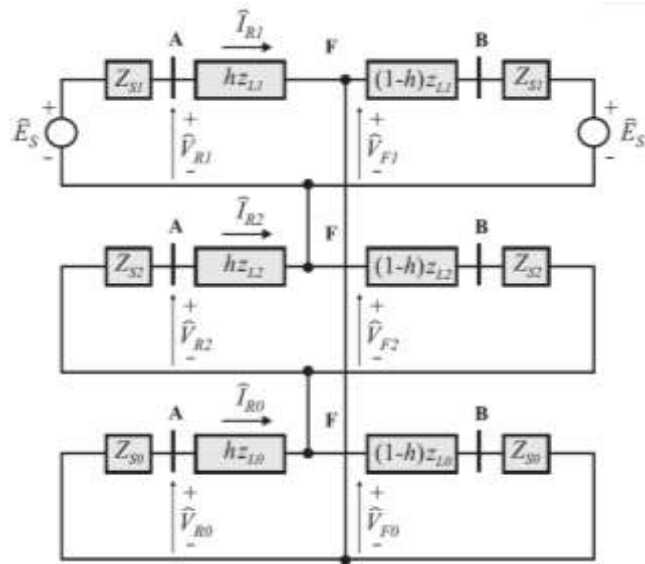
Logo,

$$hz_{L1} = \frac{\hat{V}_{Ra} - \hat{V}_{Rb}}{\hat{I}_{Ra} - \hat{I}_{Rb}} = \frac{\hat{V}_{Rb} - \hat{V}_{Rc}}{\hat{I}_{Rb} - \hat{I}_{Rc}} = \frac{\hat{V}_{Rc} - \hat{V}_{Ra}}{\hat{I}_{Rc} - \hat{I}_{Ra}}. \quad (2.6)$$

Conforme será visto mais adiante, também se pode determinar a impedância de sequência positiva do trecho de linha entre o relé e o local da falta, nas faltas trifásicas, a partir das unidades de impedância do tipo fase-terra do relé de distância:  $Z_{AT}$ ,  $Z_{BT}$ ,  $Z_{CT}$ . Dessa forma, se definiria  $hz_{L1}$  por:

$$hz_{L1} = \frac{\hat{V}_{Ra}}{\hat{I}_{Ra}} = \frac{\hat{V}_{Rb}}{\hat{I}_{Rb}} = \frac{\hat{V}_{Rc}}{\hat{I}_{Rc}}. \quad (2.7)$$

Por fim, uma falta monofásica na fase A pode ser descrita em termos do circuito de sequência indicado na Figura 2.5.



**Figura 2.5.** Circuitos de sequência para uma falta monofásica na fase A.

Novamente, por simplicidade, será assumido que a impedância de falta seja nula. Com isso, obtêm-se as seguintes relações:

$$\hat{V}_{F1} = \hat{V}_{R1} - hZ_{L1}\hat{I}_{R1} , \quad (2.8a)$$

$$\hat{V}_{F2} = \hat{V}_{R2} - hZ_{L1}\hat{I}_{R2} , \quad (2.8b)$$

$$\hat{V}_{F0} = \hat{V}_{R0} - hZ_{L0}\hat{I}_{R0} . \quad (2.8c)$$

Define-se uma nova corrente  $\hat{I}'_{Ra}$ , denominada de corrente compensada, dada por:

$$\hat{I}'_{Ra} = \hat{I}_{Ra} + \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}}\hat{I}_{R0} = \hat{I}_{Ra} + K_0\hat{I}_{R0} , \quad (2.9)$$

de forma que  $K_0$  é denominado de fator de compensação de sequência zero. Ele é responsável por compensar o acoplamento mútuo de sequência zero entre a fase defeituosa e as fases sãs (SILVA, 2009).

Finalmente, a impedância de sequência positiva do trecho da linha entre o relé e o local da falta pode ser obtida por:

$$hZ_{L1} = \frac{\hat{V}_{Ra}}{\hat{I}'_{Ra}} = \frac{\hat{V}_{Ra}}{\hat{I}_{Ra} + K_0\hat{I}_{R0}} . \quad (2.10)$$

De maneira análoga, obtêm-se as impedâncias de sequência positiva para faltas ocasionadas nas demais fases B e C.

Um resumo dos sinais de entrada das seis unidades de impedância do relé de distância encontra-se na Tabela 2.1 a seguir (ZIEGLER, 2006).

**Tabela 2.1.** Sinais de entrada para unidades fase-terra e fase-fase do relé de distância.

Unidade	Sinais de Tensão	Sinais de Corrente
$Z_{AT}$	$\hat{V}_a$	$\hat{I}_a + K_0 \hat{I}_0$
$Z_{BT}$	$\hat{V}_b$	$\hat{I}_b + K_0 \hat{I}_0$
$Z_{CT}$	$\hat{V}_c$	$\hat{I}_c + K_0 \hat{I}_0$
$Z_{AB}$	$\hat{V}_a - \hat{V}_b$	$\hat{I}_a - \hat{I}_b$
$Z_{BC}$	$\hat{V}_b - \hat{V}_c$	$\hat{I}_b - \hat{I}_c$
$Z_{CA}$	$\hat{V}_c - \hat{V}_a$	$\hat{I}_c - \hat{I}_a$

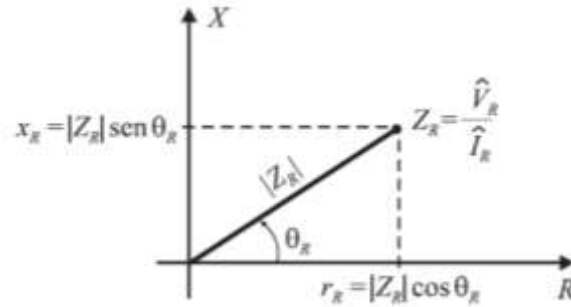
Uma vez definidas as unidades de impedância do relé de distância, tem-se que para cada tipo de falta incidente na linha de transmissão, haverá uma seleção de unidades capazes de medir a impedância de sequência positiva do trecho de linha entre o terminal do relé e o ponto de falta, conforme indicado na Tabela 2.2 (ZIEGLER, 2006).

**Tabela 2.2.** Unidades do relé que devem operar para cada tipo de falta.

Tipo da Falta	Fases Envolvidas	Sigla	Unidades do Relé					
			$Z_{AT}$	$Z_{BT}$	$Z_{CT}$	$Z_{AB}$	$Z_{BC}$	$Z_{CA}$
Monofásica	A	AT	✓	-	-	-	-	-
	B	BT	-	✓	-	-	-	-
	C	CT	-	-	✓	-	-	-
Bifásica	A e B	AB	-	-	-	✓	-	-
	B e C	BC	-	-	-	-	✓	-
	A e C	AC	-	-	-	-	-	✓
Bifásica para Terra	A e B	ABT	✓	✓	-	✓	-	-
	B e C	BCT	-	✓	✓	-	✓	-
	A e C	ACT	✓	-	✓	-	-	✓
Trifásica	A, B e C	ABC	✓	✓	✓	✓	✓	✓

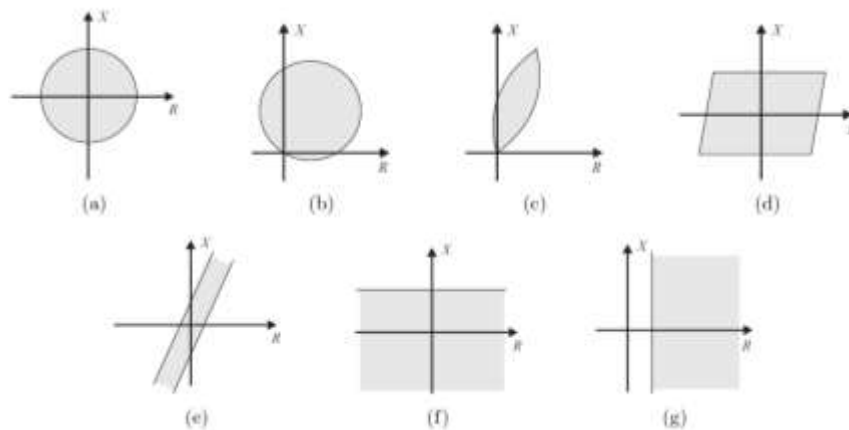
## 2.2 DIAGRAMA R-X E AS CARACTERÍSTICAS DE OPERAÇÃO

Uma forma propícia de se representar as impedâncias medidas pelo relé, é por meio da utilização do diagrama R-X, conforme indicado na Figura 2.6.



**Figura 2.6.** Diagrama R-X (SILVA, 2009).

No diagrama da Figura 2.6, a componente real (abscissa) da impedância calculada pelo relé é dada por  $r_R = |Z_R| \cos \theta_R$  e a componente imaginária (ordenada) é dada por  $x_R = |Z_R| \sin \theta_R$ . A depender de uma característica de operação, e com base no valor de impedância de sequência positiva medida entre o relé e o local da falta, o relé irá atuar ou não. Caso o valor de impedância medido se encontre dentro dos limites de operação definidos pela característica, o relé deverá atuar. Tais características de operação apresentam diversas formas geométricas, tais como: círculos, retângulos e elipses, assim como a combinação entre elas, conforme ilustrado na Figura 2.7. A seleção da característica a ser utilizada depende de um estudo do comportamento do sistema a ser protegido e das características disponíveis nos relés.



**Figura 2.7.** Tipos de características de operação do relé de distância: (a) Impedância; (b) Mho; (c) Lenticular; (d) Retângulo; (e) Blinder; (f) Reatância; (g) Resistência.

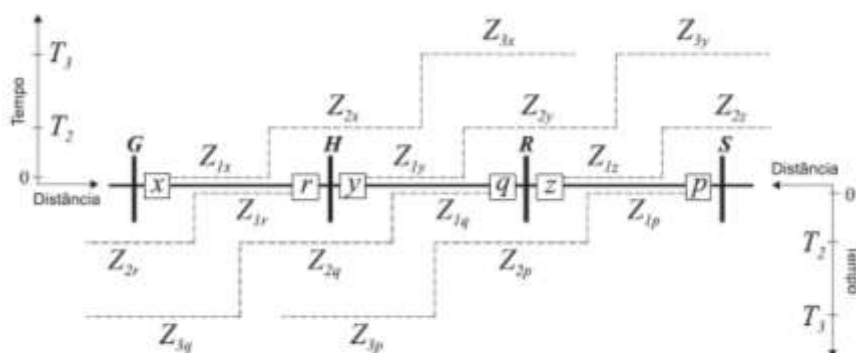
## 2.3 ZONAS DE PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA

As características de seletividade e coordenação de um relé de distância estão relacionadas ao ajuste de suas zonas de proteção, que consistem de diferentes alcances, associado a diferentes tempos de atraso. Não raro são utilizadas três zonas de proteção na operação do relé, mas, a depender da aplicação, mais zonas podem ser consideradas (ZIEGLER, 2006).

Tipicamente, a impedância de alcance da primeira zona de proteção corresponde a uma porcentagem de 80 a 85% da impedância total da linha protegida. A margem de segurança de 20 a 15% se faz necessária devido às imprecisões provocadas por diversas fontes de erro, tais como os transformadores para instrumento, que podem fazer o relé medir um valor de impedância acima (subalcance) ou abaixo (sobrealcance) do valor de impedância real da linha, causando sua operação indevida (COOK, 1985). Tal zona não apresenta tempo intencional de atraso em sua operação.

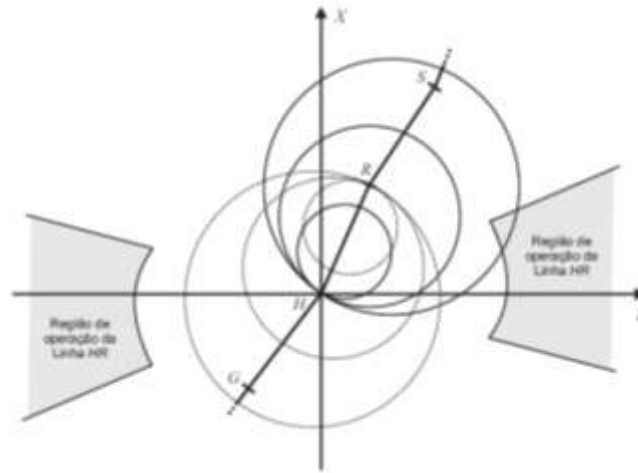
A segunda zona de proteção deve cobrir 100% da linha protegida pela primeira zona, mais aproximadamente 50% da menor linha que emane de seu terminal remoto. Tipicamente, a sua operação é retardada de um tempo  $T_2$  da ordem de 200 a 500ms.

A principal função da terceira zona de proteção é a de proteção de retaguarda para faltas ocorridas em linhas adjacentes à linha protegida pela primeira zona. Geralmente, o seu alcance é ajustado para proteger 100% da menor linha que emana do terminal remoto da linha protegida pela primeira zona, mais 20% da menor linha a sua jusante. A sua operação também é retardada de um tempo  $T_3$  da ordem de 800 ms (SILVA, 2009). Na figura 2.8, encontram-se representados os diferentes tempos de atuação do relé de distância para cada uma de suas respectivas zonas de proteção.



**Figura 2.8.** Representação das zonas de proteção de distância (SILVA, 2009).

A depender dos parâmetros implementados no comparador da proteção de distância, pode-se obter uma característica mho de operação contendo as diferentes zonas de proteção dos relés, situados nos terminais da linha HR presentes na Figura 2.8, conforme ilustrado no diagrama R-X da Figura 2.9 a seguir.



**Figura 2.9.** Representação das zonas de proteção de distância no diagrama R-X.

## 2.4 COMPARADORES

O conceito de comparadores de fase e magnitude é utilizado para implementação da proteção de distância desde os relés eletromecânicos e estáticos. Basicamente, dois sinais são comparados e a partir da sua defasagem ou da relação entre suas magnitudes, é possível distinguir entre uma situação normal de operação do sistema e uma falta (PAITHANKAR; BHIDE, 2007).

Determina-se a forma, tamanho e posição de uma característica de operação do relé no diagrama R-X, através dos parâmetros introduzidos nos comparadores. Dentre todas as características de operação, a mho é a mais difundida, por apresentar algumas atribuições bastante apropriadas para a utilização em relés de distância, tais como: alcance finito, direcionalidade, boa acomodação da resistência de falta e menor sensibilidade às oscilações de potência (ZIEGLER, 2006). Nesta seção, serão abordados os diversos tipos de comparadores no âmbito da característica mho de operação.

### 2.4.1 COMPARADOR DE FASE

Um comparador de fase determina se a diferença de ângulo entre dois fasores está dentro de uma margem especificada ou não (Schweitzer; Roberts, 1993). No caso da característica mho autopolarizada, utilizam-se os fasores de tensão de operação  $\hat{V}_{op}$  e de polarização  $\hat{V}_{pol}$ . Tais fasores são definidos da seguinte maneira (PAITHANKAR; BHIDE, 2007):

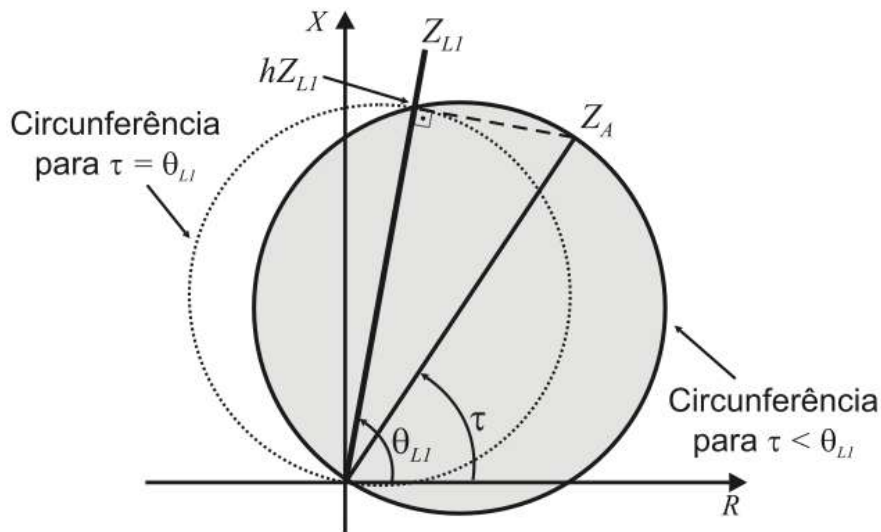
$$\hat{V}_{op} = Z_A \hat{I}_R - \hat{V}_R, \quad (2.11a)$$

$$\hat{V}_{pol} = \hat{V}_R, \quad (2.11b)$$

sendo  $\hat{V}_R$  e  $\hat{I}_R$  os fasores de tensão e corrente medidos pelo relé, respectivamente, e  $Z_A$  a impedância de alcance do relé, calculada conforme indicado na Equação 2.12 (SILVA, 2009):

$$Z_A = \frac{hZ_{L1}}{\cos(\theta_{L1} - \tau)}, \quad (2.12)$$

onde  $h$  é a porcentagem a ser protegida do comprimento total da linha de transmissão e  $\tau$  o ângulo de projeto da característica mho, ou ângulo de torque máximo do relé, ambos ilustrados na Figura 2.10.



**Figura 2.10.** Representação da característica mho no plano R-X (SILVA, 2009).



Este ângulo nos relés eletromecânicos é ajustado para ser igual ao ângulo  $\theta_{L1}$  da linha, por meio da utilização de uma impedância réplica. Entretanto, a fim de melhorar a cobertura da resistência de falta, não raro o ângulo  $\tau$  é ajustado para um valor menor que  $\theta_{L1}$ , conforme ilustrado na Figura 2.10.

Uma falta é detectada pelo relé em sua zona de proteção caso a seguinte condição seja satisfeita:

$$-90^\circ < \arg\left(\frac{\hat{V}_{op}}{\hat{V}_{pol}}\right) < 90^\circ . \quad (2.13)$$

As grandezas de operação e polarização do comparador de fase podem ser representadas em termos de impedâncias. Isso pode ser obtido dividindo a Equação 2.11 por  $\hat{I}_R$ . Com isso, obtém-se (SILVA, 2009):

$$Z_{op} = Z_A - Z_R , \quad (2.14a)$$

$$Z_{pol} = Z_R , \quad (2.14b)$$

onde a impedância aparente  $Z_R$  vista pelo relé é dada por  $\frac{\hat{V}_R}{\hat{I}_R}$ .

Todas as diferenças angulares não contidas no intervalo da Equação 2.13, significam que a impedância medida pelo relé está fora do círculo mho. As possíveis condições angulares estão indicadas nas equações a seguir (FENTIE, 2016).

Operação (dentro da característica mho):

$$-90^\circ < \arg\left(\frac{Z_{op}}{Z_R}\right) < 90^\circ . \quad (2.15)$$

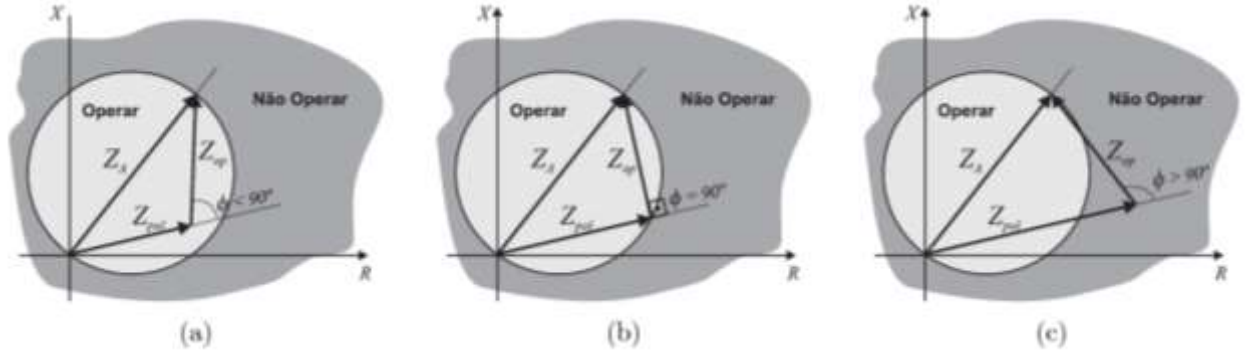
Restrição (fora da característica mho):

$$90^\circ < \arg\left(\frac{Z_{op}}{Z_R}\right) < -90^\circ . \quad (2.16)$$

Indeterminado (nos limites da característica mho):

$$\arg\left(\frac{Z_{op}}{Z_R}\right) = \pm 90^\circ . \quad (2.17)$$

As impedâncias  $Z_{op}$  e  $Z_{pol}$  podem ser representadas no plano R-X como mostrado na Figura 2.11, na qual são ilustradas as três situações possíveis para a localização de  $Z_R$ .



**Figura 2.11.** Relação entre as fases de  $Z_{op}$  e  $Z_{pol}$  para o caso de  $Z_R$ : (a) dentro da característica mho; (b) sobre a característica mho; (c) fora da característica mho.

#### 2.4.2 COMPARADOR DE MAGNITUDE

Os fasores das tensões de operação  $\hat{V}_{op}$  e de polarização  $\hat{V}_{pol}$  do comparador de magnitude para a característica mho autopolarizada são definidos como (PAITHANKAR; BHIDE, 2007):

$$\hat{V}_{op} = \frac{Z_A}{2} \hat{I}_R, \quad (2.18a)$$

$$\hat{V}_{pol} = -\hat{V}_R + \frac{Z_A}{2} \hat{I}_R. \quad (2.18b)$$

Uma falta é detectada pelo relé caso a seguinte condição seja satisfeita:

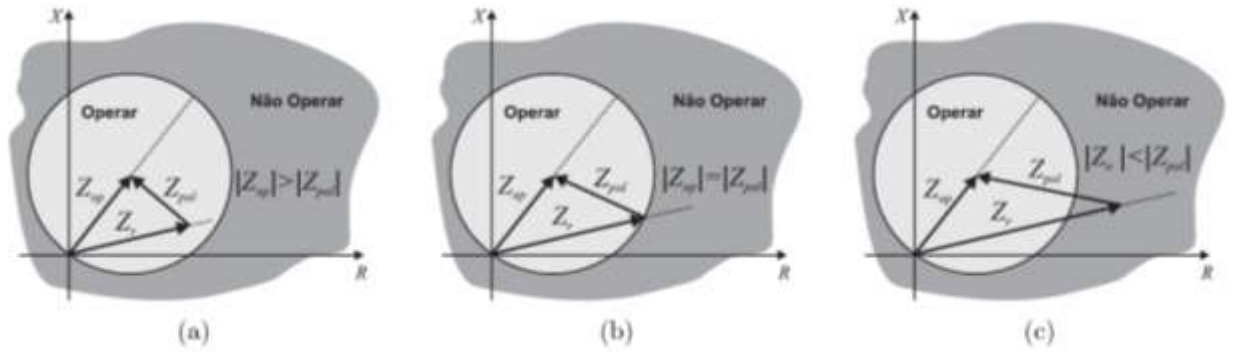
$$|\hat{V}_{op}| \geq |\hat{V}_{pol}|. \quad (2.19)$$

Tais grandezas,  $\hat{V}_{op}$  e  $\hat{V}_{pol}$ , podem também ser representadas em termos de impedâncias, da seguinte forma:

$$Z_{op} = \frac{Z_A}{2}, \quad (2.20a)$$

$$Z_{pol} = -Z_R + \frac{Z_A}{2}. \quad (2.20b)$$

As diferentes condições em que  $Z_R$ , valor de impedância medida pelo relé, pode se encontrar com relação à característica mho de operação no plano R-X se encontram a seguir.



**Figura 2.12.** Relação entre as magnitudes de  $Z_{op}$  e  $Z_{pol}$  para o caso de  $Z_R$ : (a) dentro da característica mho; (b) sobre a característica mho; (c) fora da característica mho (SILVA, 2009).

#### 2.4.3 COMPARADOR MHO PROPOSTO POR SCHWEITZER & ROBERTS (1993)

Schweitzer & Roberts (1993) propuseram um novo equacionamento para o comparador de fase tipo cosseno que implementa a característica mho. A ideia básica consiste na análise do produto de um sinal A pelo conjugado de um sinal B, conforme ilustrado a seguir:

$$\begin{aligned} S &= A \cdot B^* = (A_{re} + jA_{im}) \cdot (B_{re} + jB_{im})^* \\ &= (A_{re}B_{re} + A_{im}B_{im}) + j(A_{im}B_{re} - A_{re}B_{im}) . \end{aligned} \quad (2.21)$$

O ângulo do produto  $A \cdot B^*$  é igual ao ângulo de  $A/B$ , que representa a defasagem angular entre os sinais A e B. Sem perda de generalidade, assume-se o sinal B como referência, de modo que sua fase é considerada igual à zero, enquanto que a fase do sinal A é considerada igual a  $\theta$ . De modo que:

$$S = |A||B| \cos \theta + j|A||B| \sin \theta = P + jQ . \quad (2.22)$$

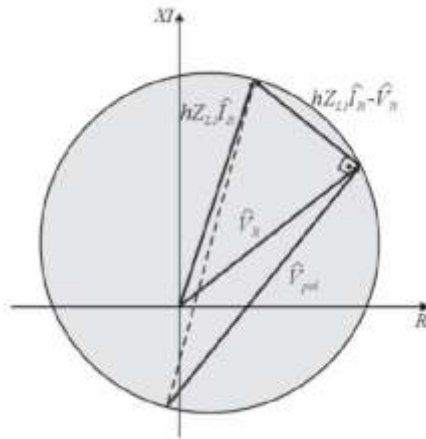
A variável P na Equação 2.22 representa um comparador de fase do tipo cosseno, de modo que seu resultado é máximo quando os sinais estão em fase e zero quando os sinais estão em quadratura. Por outro lado, a variável Q representa um

comparador de fase do tipo seno, cuja saída é máxima quando os sinais estão em quadratura e zero quando os sinais estão em fase. Desse modo, ambos os comparadores podem ser usados em relés numéricos microprocessados, a fim de implementar suas características de operação.

Particularizando-se o caso do comparador P para implementar a característica mho, os sinais A e B são substituídos por  $\hat{V}_{op}$  e  $\hat{V}_{pol}$ , de modo que (SILVA, 2016. Notas de aula):

$$P = Re [\hat{V}_{op} \cdot \hat{V}_{pol}^*] = Re [(hZ_{L1}\hat{I}_R - \hat{V}_R) \cdot \hat{V}_{pol}^*], \quad (2.23)$$

Observando a Figura 2.13, conclui-se que:  $P > 0$  representa a área dentro da circunferência mho;  $P = 0$  representa o limite da circunferência mho; e  $P < 0$  representa a área fora da circunferência mho.



**Figura 2.13.** Característica mho no plano RI-XI.

Igualando o comparador P na Equação 2.23 a 0, consegue-se determinar a equação da própria característica mho.

$$Re [(hZ_{L1}\hat{I}_R - \hat{V}_R) \cdot \hat{V}_{pol}^*] = \quad (2.24a)$$

$$= Re[hZ_{L1}\hat{I}_R \cdot \hat{V}_{pol}^*] - Re[\hat{V}_R \cdot \hat{V}_{pol}^*] = 0 \quad (2.24b)$$

Isolando o termo h, que corresponde ao alcance da zona de proteção do relé, obtém-se a seguinte expressão:

$$h = \frac{Re [\hat{V}_R \cdot \hat{V}_{pol}^*]}{Re [Z_{L1} \hat{I}_R \cdot \hat{V}_{pol}^*]} \quad (2.25)$$

Substituindo h por m na Equação 2.25, obtém-se:

$$m = \frac{Re [\hat{V}_R \cdot \hat{V}_{pol}^*]}{Re [Z_{L1} \hat{I}_R \cdot \hat{V}_{pol}^*]} \quad (2.26)$$

que representa a distância medida pelo relé em pu da impedância da linha de transmissão, que é comparada diretamente com h para determinar a operação do relé. Assim, se  $m < h$  o relé enviará um trip para os seus disjuntores associados.

Segundo Schweitzer & Roberts (1993), o comparador só é avaliado uma única vez, de modo que a variável m é comparada com os alcances das diferentes zonas de proteção. De fato, isso provê um ganho significativo na complexidade operacional no algoritmo do relé. Entretanto, para que isso de fato ocorra, as seguintes considerações devem ser feitas:

- Os ângulos de máximo torque de todas as características devem ser iguais. Assim, o que vai diferenciá-las são apenas seus alcances. Por simplicidade, os autores utilizam o ângulo  $\theta_{L1}$  da impedância de sequência positiva da linha de transmissão.
- A fim de se aumentar a acomodação de resistência de faltas, faz-se necessário a utilização de uma tensão de polarização que expanda a característica mho.

De acordo com Schweitzer & Roberts (1993), o denominador da Equação 2.26 representa um comparador de fase, que pode ser utilizado para determinar a direcionalidade da corrente de curto-circuito. De fato, para faltas à frente do relé esse comparador será maior que zero, enquanto que para faltas reversas ele será menor que zero (SILVA, 2016. Notas de aula).

## 2.5 POLARIZAÇÃO NAS CARACTERÍSTICAS MHO

O termo  $\hat{V}_{op}$  na Equação 2.23, é definido como o sinal de operação. O sinal de operação  $\hat{V}_{op}$  pode ser comparado com o sinal de polarização  $\hat{V}_{pol}$  a fim de se

determinar a localização da falta. É importante garantir que o ângulo do sinal de polarização permaneça relativamente constante durante uma falta, uma vez deve servir como referência de tensão no comparador de fase (FENTIE, 2016). A seguir, serão abordadas algumas das principais técnicas de polarização utilizadas na detecção de faltas.

### **2.5.1 CARACTERÍSTICA MHO AUTOPOLARIZADA**

A característica mho autopolarizada foi empregada por vários anos nos relés eletromecânicos. Suas vantagens e limitações frente às demais características de operação foram bastante exploradas, de modo que ainda hoje muitos relés digitais comerciais a implementam (ZIEGLER, 2006). A denominação de autopolarizada se deve ao fato de que, nessa característica, a grandeza de polarização  $\hat{V}_{pol}$  utilizada nos comparadores de fase é a própria tensão medida pelo relé. Conforme indicado na Equação 2.11b.

Esse tipo de polarização coloca em risco a segurança e confiabilidade do elemento de proteção durante faltas próximas ao terminal do relé, uma vez que a tensão é muito pequena para ser precisamente medida. Em consequência disso, relés modernos utilizam outras formas de polarização que cumprem de modo mais confiável a detecção de todos os tipos de faltas e localizações (FENTIE, 2016).

### **2.5.2 CARACTERÍSTICA MHO POLARIZADA**

As características mho polarizadas são utilizadas com a finalidade de contornar a deficiência existente no modelo autopolarizado na detecção de faltas próximas ao ponto de instalação do relé. Na característica mho polarizada, utiliza-se como tensão de polarização  $\hat{V}_{pol}$ , a tensão medida pelo relé  $\hat{V}_R$  mais uma parcela de suplementação, que depende do tipo de polarização utilizada (ZIEGLER, 2006; COOK, 1985).

#### **2.5.2.1 POLARIZAÇÃO CRUZADA**

A polarização cruzada consiste em suplementar a tensão na fase defeituosa com uma tensão em quadratura, referente às fases sãs. Na Figura 2.14(a), ilustra-se a seleção da tensão de suplementação  $\hat{V}_{bc}$  para falta monofásica na fase A, enquanto a tensão

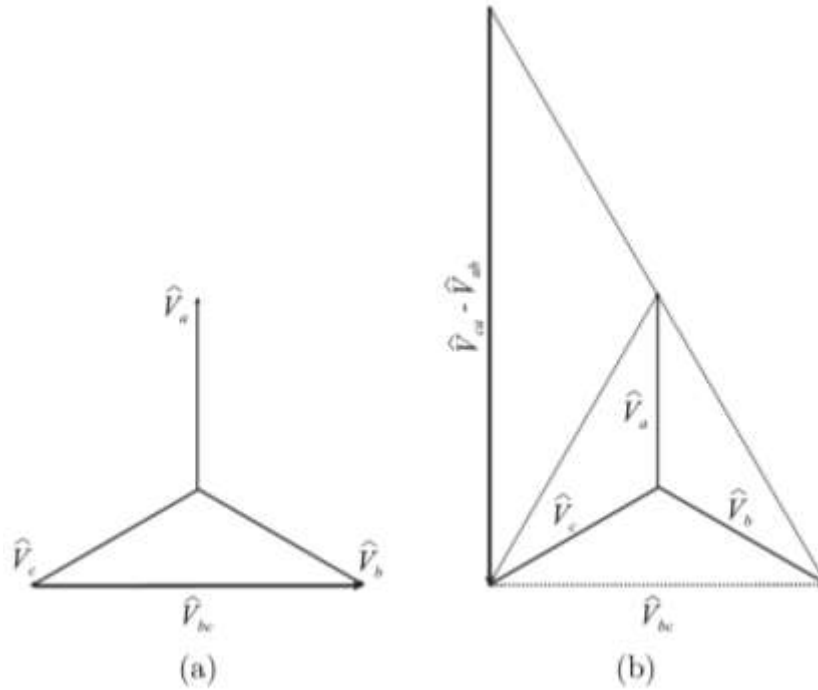
$\hat{V}_{ca} - \hat{V}_{ab}$ , exibida na Figura 2.14(b), é utilizada para suplementar faltas bifásicas entre as fases B e C. Na Tabela 2.3, são representadas as tensões de suplementação utilizadas para cada uma das unidades de um relé de distância (ZIEGLER, 2006).

Com a polarização cruzada, calcula-se a tensão  $\hat{V}_{pol}$  como:

$$\hat{V}_{pol} = (1 - k_p)\hat{V}_R + \frac{jk_p}{\sqrt{3}}\hat{V}_{sup}, \quad (2.27)$$

sendo  $k_p$  a porcentagem de suplementação e  $\hat{V}_{sup}$  a tensão de suplementação.

Uma desvantagem desse tipo de suplementação está no fato de que não há suplementação no caso de faltas trifásicas, uma vez que todas as fases são afetadas. Neste caso, deve-se utilizar uma suplementação a partir de uma memória de tensão pré-falta (SILVA, 2009).



**Figura 2.14.** Tensão de suplementação para a tensão: (a)  $\hat{V}_a$  (falta fase-terra); (b)  $\hat{V}_{bc}$  (falta fase-fase).

**Tabela 2.3.** Tensão de suplementação das unidades fase-terra e fase-fase do relé de distância.

Unidade	Tensão de Suplementação
$Z_{AT}$	$\hat{V}_{bc}$
$Z_{BT}$	$\hat{V}_{ca}$
$Z_{CT}$	$\hat{V}_{ab}$
$Z_{AB}$	$\hat{V}_{bc} - \hat{V}_{ca}$
$Z_{BC}$	$\hat{V}_{ca} - \hat{V}_{ab}$
$Z_{CA}$	$\hat{V}_{ab} - \hat{V}_{bc}$

### 2.5.2.2 POLARIZAÇÃO POR MEMÓRIA DE TENSÃO

A polarização por meio da memória de tensão consiste em suplementar a tensão na fase defeituosa utilizando-se as tensões de pré-falta. Este tipo de polarização pode ser empregada para qualquer tipo de falta, mas devem-se tomar precauções no caso de sistemas nos quais a frequência de operação possa variar durante a falta (ZIEGLER, 2006).

Utilizando-se o esquema de polarização por memória de tensão, a tensão de polarização  $\hat{V}_{pol}$  passa a ser calculada como:

$$\hat{V}_{pol} = (1 - k_p)\hat{V}_R + k_p\hat{V}_{pre} , \quad (2.28)$$

sendo  $\hat{V}_{pre}$  a tensão de suplementação e  $k_p$  a porcentagem de suplementação. Na prática, esta polarização só é utilizada durante um intervalo de alguns ciclos após a detecção da falta, permitindo a detecção de faltas trifásicas com tensão próxima à zero.

Em ambos os casos, com a polarização cruzada ou com a polarização por memória de tensão de pré-falta, a característica de operação do relé é expandida envolvendo a origem, permitindo a detecção da falta que resulte numa tensão próxima à zero. Entretanto, isso só ocorre para faltas à frente do relé. No caso de faltas reversas, a característica de operação contrai-se, evitando operação indevida. Este comportamento

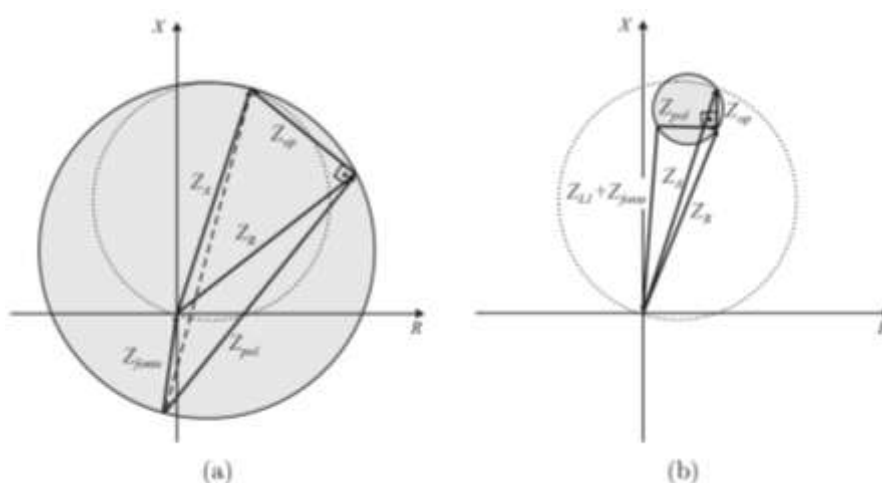


é muito conveniente e é amplamente empregado na proteção de linhas de transmissão (ZIEGLER, 2006).

Na Figura 2.15(a), ilustra-se a expansão da característica mho durante a ocorrência de defeitos na própria linha protegida. Na Figura 2.15(b), por sua vez, pode-se verificar a contração da característica, que resulta da ocorrência de faltas reversas. Nas Figuras 2.15, a característica mho polarizada está destacada pela linha contínua e a característica mho autopolarizada está pontilhada e  $Z_{\text{fonte}}$  representa a impedância da fonte equivalente a montante do relé (SILVA, 2009).

Há diferentes tipos de polarização, que dependem da escolha das tensões de suplementação  $\hat{V}_{\text{pre}}$ . Dentre elas, a mais utilizada é a polarização por memória de tensão de sequência positiva (SCHWEITZER; ROBERTS, 1993).

Além desses modelos apresentados, os relés podem também utilizar uma combinação das polarizações cruzada e por memória de tensão de pré-falta, a qual se dá o nome de polarização dual.



**Figura 2.15.** Característica mho polarizada: (a) falta na direção direta; (b) falta na direção reversa (SILVA, 2009).

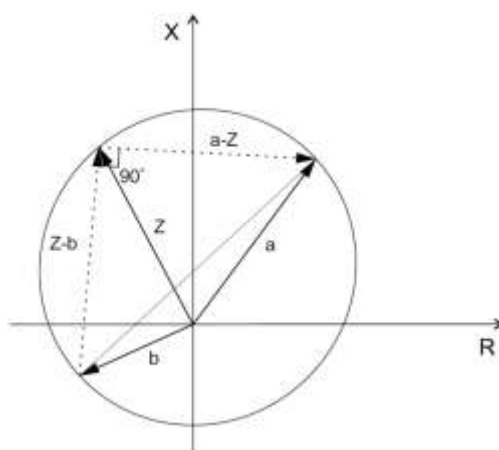
### 3 CARACTERÍSTICA DE DISTÂNCIA MHO DINÂMICA

Neste capítulo será analisado em detalhe o comportamento dinâmico da característica mho quando empregado polarização por memória de tensão de sequência positiva. Tal técnica de polarização visa obter uma referência confiável de tensão para garantir maior sensibilidade e segurança da proteção de distância (ZIEGLER, 2006). Esta estratégia tem sido amplamente utilizada nos relés numéricos microprocessados, uma vez que apresenta melhor comportamento frente a todos os tipos de falta, mesmo aquelas com tensões próximas a zero ou mesmo em situações nas quais se observa inversão de fase das tensões, o que pode ocorrer em linhas de transmissão com compensação em série (CIGRÉ, 2011).

A Equação 3.1 corresponde ao comparador de fase utilizado na descrição dos limites da característica mho de operação, sendo  $S_1$  e  $S_2$  os sinais de operação e polarização respectivamente (CALERO, 2009). Além disso,  $\bar{a}$  é o vetor que corresponde à impedância de alcance da proteção de distância,  $\bar{b}$  corresponde ao vetor de expansão da característica mho dinâmica, enquanto que  $Z$  é a impedância aparente calculada pelo relé.

$$\arg\left(\frac{S_1}{S_2}\right) = \arg\left(\frac{\bar{a}-Z}{Z-\bar{b}}\right) = \pm 90^\circ. \quad (3.1)$$

Tal equação pode ser visualizada na Figura 3.1 para um conjunto arbitrário de vetores  $\bar{a}$  e  $\bar{b}$ .



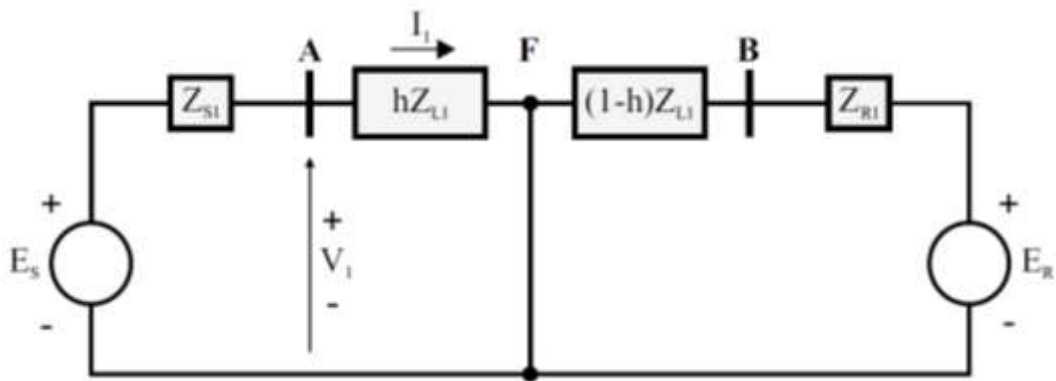
**Figura 3.1.** Círculo definido por vetores  $\bar{a}$  e  $\bar{b}$  arbitrários no plano R-X.

A Figura 3.1 ilustra graficamente a Equação 3.1. Uma metade do círculo satisfaz a condição de  $+90^\circ$  e a outra metade satisfaz a condição  $-90^\circ$ . Nota-se que o círculo é dividido pela linha que conecta os vetores  $\bar{a}$  e  $\bar{b}$  (CALERO, 2009). A fim de simplificar as análises desenvolvidas ao longo desse capítulo, considera-se que o vetor de alcance  $\bar{a}$  corresponde a própria impedância de sequência positiva da linha de transmissão protegida  $Z_{L1}$ .

Dessa forma, com o intuito de se compreender as diferentes expansões e contrações da característica mho polarizada para cada um dos tipos de falta, precisa-se encontrar os possíveis valores que os vetores  $\bar{a}$  e  $\bar{b}$  podem adquirir.

### 3.1 SISTEMA ANALISADO

A fim de se verificar as propriedades de expansão e contração da característica mho dinâmica, será utilizado um sistema com duas fontes, local e remota, conforme ilustrado na Figura 3.2. Além das faltas à frente dos relés, serão analisados curtos-circuitos reversos para cada um dos tipos de falta: trifásica, bifásica, bifásica-terra e monofásica.

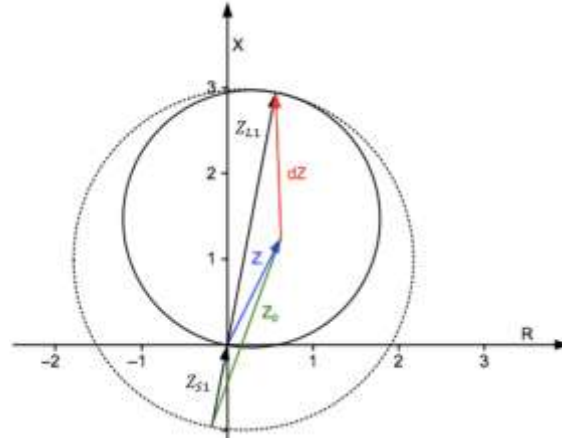


**Figura 3. 2.**Circuito de sequência para uma falta trifásica à frente.

### 3.2 FALTA TRIFÁSICA

Considera-se a origem do plano de impedância como a posição do terminal do relé. Durante uma falta na linha, o valor medido da tensão de falta diminui, enquanto a tensão de sequência positiva memorizada  $V_{1mem}$  inicialmente mantém o seu valor presente nos instantes pré-falta.

No plano de impedância, isso significa que a magnitude da impedância medida pelo relé  $Z$  é significativamente menor que a impedância de polarização  $Z_p$ . Com isso, a característica mho dinâmica envolve a origem, conforme indicado na Figura 3.3 (FENTIE, 2016).



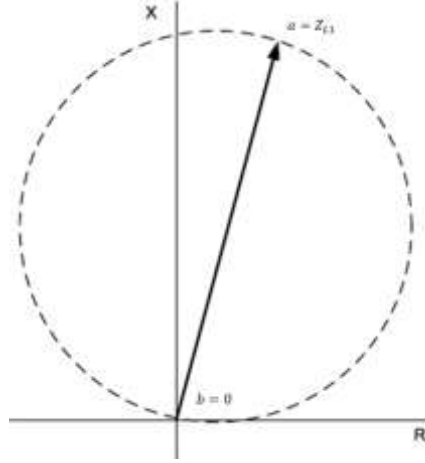
**Figura 3.3.** Característica mho dinâmica durante faltas trifásicas à frente (expansão máxima) (FENTIE, 2016).

Calcula-se a impedância de polarização  $Z_p$  dividindo a tensão de polarização de sequência positiva ( $V_{1mem}$ ) pela corrente de falta. Desconsiderando o efeito de fluxo de carga,  $V_{1mem}$  é inicialmente igual à tensão da fonte  $E_S$ , dessa forma,  $Z_p$  é igual à impedância da fonte  $Z_{S1}$  acrescido da impedância aparente  $Z$  medida pelo relé dos seus terminais até a falta, de acordo com a Equação 3.2. Isso pode ser observado graficamente na Figura 3.3 (FENTIE, 2016).

$$Z_p = Z_{S1} + Z . \quad (3.2)$$

A expansão da característica mho para faltas à frente do relé depende da magnitude da impedância da fonte, tal conceito é conhecido como *expanding back to the source*. Quanto maior for a impedância da fonte com relação à impedância da linha (SIR), maior será a expansão da característica mho dinâmica (FENTIE, 2016).

Eventualmente, a tensão  $V_{1mem}$  decai para o valor de tensão de sequência positiva medida  $V_1$ , que por sua vez é igual às tensões em cada uma das fases  $V_A$ ,  $V_B$  e  $V_C$  em um sistema balanceado durante faltas trifásicas. Com isso, a característica mho dinâmica, com o tempo, se reduz ao tamanho da característica mho autopolarizada nas faltas trifásicas, conforme indicado na Figura 3.4.



**Figura 3.4.** Característica mho dinâmica durante faltas trifásicas (regime permanente) (CALERO, 2009).

Pode-se deduzir a expansão da característica mho dinâmica em regime permanente de falta a partir da análise do circuito de sequência positiva indicado na Figura 3.2, considerando uma falta trifásica franca no ponto F à frente do terminal do relé situado no ponto A, conforme exposto no desenvolvimento a seguir.

Sinal de Operação,

$$S_1 = Z_{L1}\hat{I}_1 - \hat{V}_1 = Z_{L1}\hat{I}_1 - hZ_{L1}\hat{I}_1. \quad (3.3a)$$

Sinal de Polarização,

$$S_2 = \hat{V}_1 = hZ_{L1}\hat{I}_1. \quad (3.3b)$$

Calculando os vetores  $\bar{a}$  e  $\bar{b}$  da característica mho dinâmica,

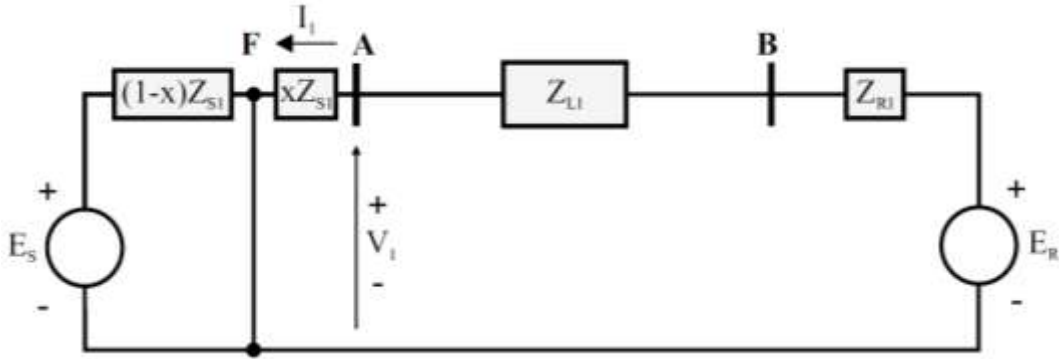
$$\frac{\frac{S_1}{\hat{I}_1}}{\frac{S_2}{\hat{I}_1}} = \frac{Z_{L1} - hZ_{L1}}{hZ_{L1}}. \quad (3.3c)$$

A partir da Equação (3.3c) e com base na Equação 3.1, identificam-se os vetores  $\bar{a}$  e  $\bar{b}$ .

$$\begin{aligned}\bar{a} &= Z_{L1} , \\ \bar{b} &= 0 .\end{aligned}\tag{3.3d}$$

Portanto, tem-se que para faltas trifásicas à frente do relé, as características dinâmica e autopolarizada se sobrepõem assim que a tensão de memória de sequência positiva atinge seu valor de regime permanente de falta (FENTIE, 2016), conforme indicado na Figura 3.4.

Faltas reversas podem ser simuladas deslocando-se o fasor de corrente de falta em  $180^\circ$ , conforme indicado na Figura 3.5. Para uma falta reversa, o relé mede a corrente fornecida pelo terminal remoto  $E_R$ , de forma que a impedância da fonte vista pelo relé esteja a sua frente, com relação à localização da falta, e igual a  $Z_{L1} + Z_{R1}$  (FENTIE, 2016).



**Figura 3.5.** Circuito de sequência para uma falta trifásica reversa.

As seguintes deduções exibem o comportamento em regime permanente de falta da característica mho dinâmica para faltas trifásicas reversas.

Sinal de Operação,

$$S_1 = Z_{L1}\hat{I}_1 - xZ_{s1}\hat{I}_1 .\tag{3.4a}$$

Sinal de Polarização,

$$S_2 = \hat{V}_1 = \hat{I}_1 xZ_{s1} .\tag{3.4b}$$

onde  $xZ_{S1}$  é o trecho de impedância de sequência positiva da fonte local medida pelo relé durante faltas reversas.

Com base na Equação 3.1, tem-se que:

$$\frac{\frac{S_1}{\hat{I}_1}}{\frac{S_2}{\hat{I}_1}} = \frac{Z_{L1} - xZ_{S1}}{xZ_{S1}}. \quad (3.4c)$$

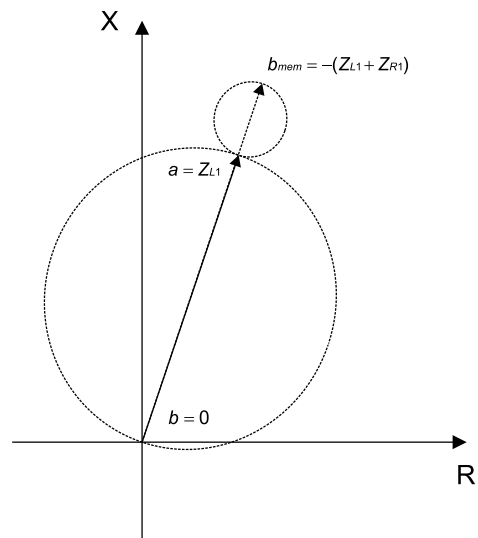
$$\begin{aligned} \bar{a} &= Z_{L1} . \\ \bar{b} &= 0 . \end{aligned} \quad (3.4d)$$

O valor encontrado para  $\bar{b}$  em regime permanente de falta sugere que à medida que a tensão de sequência positiva memorizada se aproxima do valor da tensão de falta, a característica dinâmica se aproxima da característica mho autopolarizada. Conforme mencionado anteriormente, o valor da impedância da fonte vista pelo relé, durante faltas reversas, passa ser  $Z_{L1} + Z_{R1}$ . Uma vez que a expansão máxima da característica dinâmica é função da impedância da fonte vista pelo relé, tem-se que isso ocorre quando  $\bar{b}_{mem} = -(Z_{L1} + Z_{R1})$ .

É importante notar que para uma falta reversa, o termo  $(Z_{L1} + Z_{R1})$  apresenta uma defasagem de  $180^\circ$  devido à inversão do sentido das correntes que atravessam os TCs, provocando um encolhimento da característica mho dinâmica. Além disso, os vetores  $Z$ , impedância medida pelo relé, e  $Z_p$ , impedância de polarização, também invertem suas direções para faltas atrás dos terminais do relé.  $Z_{L1}$  é constante e permanece definido pelo ajuste de alcance da proteção de distanciado relé.

O fasor da impedância de polarização  $Z_p$  tem origem na extremidade do vetor de expansão  $\bar{b}$ , dirigindo-se até a impedância medida  $Z$ . Devido ao fato de que a característica mho dinâmica é definida entre a retaguarda de  $Z_p$  até a ponta de  $Z_{L1}$ , o círculo dinâmico se torna menor que a característica mho autopolarizada sob esta condição. Uma característica de operação menor durante faltas reversas agrega maior confiabilidade à proteção de distância do relé (FENTIE, 2016).

A Figura 3.6 a seguir ilustra a situação de expansão máxima da característica mho dinâmica durante faltas trifásicas reversas.

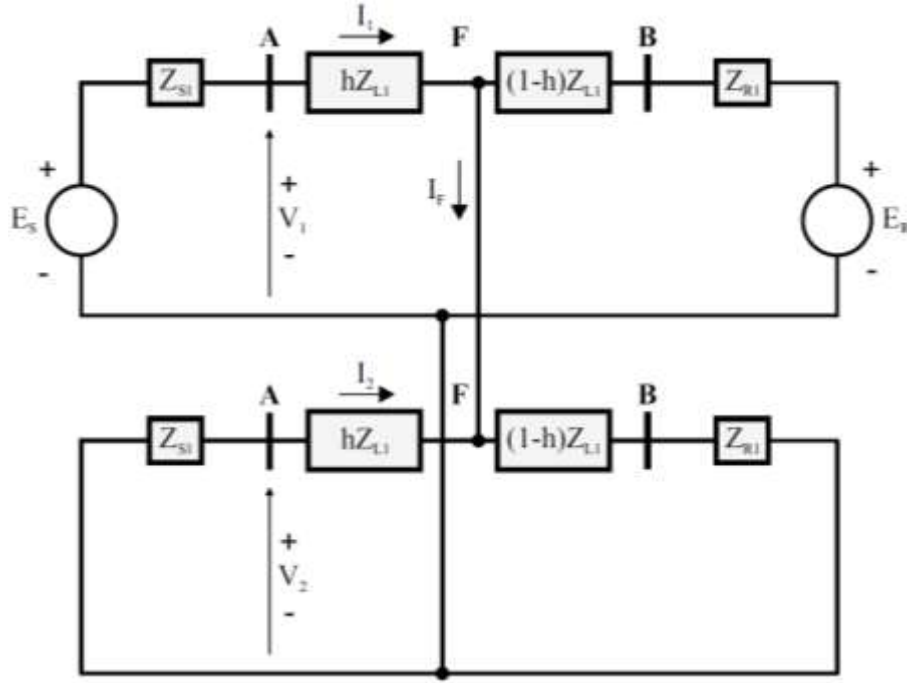


**Figura 3.6.** Característica mho dinâmica durante falta trifásica reversa.

### 3.3 FALTA BIFÁSICA

Durante uma falta bifásica à frente do relé, conforme ilustrado na Figura 3.7, a característica mho dinâmica, inicialmente, apresenta uma expansão que corresponde à impedância da fonte local, semelhante ao caso da falta trifásica. Entretanto, em regime permanente de falta, o vetor de expansão decai conforme detalhado a seguir.





**Figura 3.7.** Circuitos de sequência para uma falta bifásica BC à frente.

Sinal de Operação,

$$\begin{aligned}
 S_1 &= Z_{L1} \hat{I}_{BC} - \hat{V}_{BC} = Z_{L1} (\hat{I}_B - \hat{I}_C) - (\hat{V}_B - \hat{V}_C) \\
 &= Z_{L1} [a^2 \hat{I}_1 + a \hat{I}_2 - (a \hat{I}_1 + a^2 \hat{I}_2)] - [a^2 \hat{V}_1 + a \hat{V}_2 - (a \hat{V}_1 + a^2 \hat{V}_2)] \\
 &= Z_{L1} [\hat{I}_1 (-j\sqrt{3}) + \hat{I}_2 (j\sqrt{3})] - [\hat{V}_1 (-j\sqrt{3}) + \hat{V}_2 (j\sqrt{3})] \\
 &= Z_{L1} [(C_1 \hat{I}_F) (-j\sqrt{3}) + (-C_2 \hat{I}_F) (j\sqrt{3})] \\
 &\quad - [\{(hZ_{L1} \hat{I}_F)(C_1 + C_2) + (C_2 \hat{I}_F) Z_{S1}\} (-j\sqrt{3}) + \{(C_2 \hat{I}_F) Z_{S1} (j\sqrt{3})\}] \\
 &= Z_{L1} [(-j\sqrt{3}) \hat{I}_F (C_1 + C_2)] - [(hZ_{L1} \hat{I}_F) (C_1 + C_2) (-j\sqrt{3})],
 \end{aligned} \tag{3.5a}$$

sendo,

$$\begin{aligned}
C_1 &= \frac{(1-h)Z_{L1} + Z_{R1}}{Z_{S1} + Z_{L1} + Z_{R1}} \\
C_2 &= \frac{(1-h)Z_{L2} + Z_{R2}}{Z_{S2} + Z_{L2} + Z_{R2}} \\
\hat{V}_1 &= C_1 \hat{I}_F (hZ_{L1}) + C_2 \hat{I}_F (hZ_{L1} + Z_{S1}) \\
\hat{V}_2 &= C_2 \hat{I}_F Z_{S1} \\
\hat{I}_1 &= C_1 \hat{I}_F \\
\hat{I}_2 &= -C_2 \hat{I}_F .
\end{aligned} \tag{3.5b}$$

Sinal de Polarização,

$$\begin{aligned}
S_2 &= \hat{V}_{BC1} = \hat{V}_{B1} - \hat{V}_{C1} = (-j\sqrt{3})\hat{V}_1 \\
&= (-j\sqrt{3})[(hZ_{L1}\hat{I}_F)(C_1 + C_2) + (C_2\hat{I}_F)Z_{S1}] .
\end{aligned} \tag{3.5c}$$

Determina-se  $\bar{a}$  e  $\bar{b}$  através das relações a seguir.

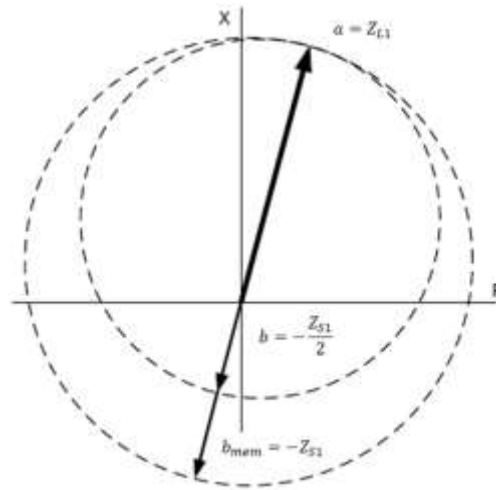
$$\frac{\frac{S_1}{\hat{I}_F}}{\frac{S_2}{\hat{I}_F}} = \frac{Z_{L1}[C_1 + C_2] - [(hZ_{L1})(C_1 + C_2)]}{[(hZ_{L1})(C_1 + C_2) + C_2Z_{S1}]} = \tag{3.5d}$$

$$\frac{\frac{S_1}{\hat{I}_F}}{\frac{S_2}{\hat{I}_F}} = \frac{Z_{L1} - hZ_{L1}}{hZ_{L1} + \frac{C_2}{C_1 + C_2}Z_{S1}} . \tag{3.5e}$$

Considerando  $C_1 = C_2$ , tem-se que:

$$\begin{aligned}
\bar{a} &= Z_{L1} , \\
\bar{b} &= \frac{-Z_{S1}}{2} .
\end{aligned} \tag{3.5f}$$

Uma vez que o diâmetro da característica mho de operação é definido entre as extremidades dos vetores  $\bar{a}$  e  $\bar{b}$ , tem-se que de acordo com as deduções exibidas, para uma falta bifásica à frente do relé, a característica mho dinâmica inicialmente apresenta uma expansão de módulo igual à impedância da fonte  $Z_{S1}$  e que eventualmente decresce para  $0,5 \cdot Z_{S1}$ . Isso indica que a característica dinâmica não se reduz ao tamanho do círculo mho autopolarizado em regime permanente de falta, conforme indicado na Figura 3.8, uma vez que a tensão memorizada de polarização  $\hat{V}_{BC1mem}$  em regime permanente de falta excede a quantidade medida  $\hat{V}_{BC}$ . No plano de impedância, isso significa que a impedância de polarização  $Z_p$  sempre excede a impedância  $Z$  medida pelo relé (FENTIE, 2016).



**Figura 3.8.** Característica mho dinâmica durante faltas bifásicas à frente (CALERO, 2009).

Após analisar as unidades de impedância afetadas pela falta, pode-se também verificar o comportamento dinâmico da característica de operação das unidades de impedância não afetadas pela falta.

Durante uma falta bifásica BC, tem-se o seguinte comportamento na característica dinâmica de operação para a unidade de impedância  $Z_{AB}$ .

Sinal de Operação,

$$\begin{aligned}
S_1 &= Z_{L1}\hat{I}_{AB} - \hat{V}_{AB} \\
&= Z_{L1}(\hat{I}_A - \hat{I}_B) - (\hat{V}_A - \hat{V}_B) \\
&= Z_{L1}[(\hat{I}_1 + \hat{I}_2) - (a^2\hat{I}_1 + a\hat{I}_2)] - [\hat{V}_1 + \hat{V}_2 - (a^2\hat{V}_1 + a\hat{V}_2)] \\
&= Z_{L1}[-(a^2\hat{I}_1 + a\hat{I}_2)] - [\hat{V}_1 + \hat{V}_2 - (a^2\hat{V}_1 + a\hat{V}_2)] \\
&= Z_{L1}[\hat{I}_1(j\sqrt{3})] - [\hat{I}_1(2hZ_{L1} + Z_{S1})(\sqrt{3}\angle 30^\circ) + \hat{I}_1(Z_{S1})(\sqrt{3}\angle -30^\circ)],
\end{aligned} \tag{3.6a}$$

sendo,

$$\begin{aligned}
C_1 = C_2 &= \frac{(1-h)Z_{L1} + Z_{R1}}{Z_{S1} + Z_{L1} + Z_{R1}} \\
\hat{I}_1 &= C_1\hat{I}_F \\
\hat{I}_2 &= -C_2\hat{I}_F = -C_1\hat{I}_F = -\hat{I}_1 \\
\hat{V}_1 &= C_1\hat{I}_F(hZ_{L1}) + C_2\hat{I}_F(hZ_{L1} + Z_{S1}) = \hat{I}_1(2hZ_{L1} + Z_{S1}) \\
\hat{V}_2 &= C_2\hat{I}_F Z_{S1} = \hat{I}_1 Z_{S1}.
\end{aligned} \tag{3.6b}$$

Sinal de Polarização,

$$\begin{aligned}
S_2 &= \hat{V}_{AB1} = \hat{V}_{A1} - \hat{V}_{B1} \\
&= \hat{V}_1 - a^2\hat{V}_1 = \hat{V}_1(1 - a^2) = \hat{V}_1(\sqrt{3}\angle 30^\circ) \\
&= \hat{I}_1(2hZ_{L1} + Z_{S1})(\sqrt{3}\angle 30^\circ).
\end{aligned} \tag{3.6c}$$

Conforme indicado a seguir, podem-se determinar os vetores  $\bar{a}$  e  $\bar{b}$ .

$$\begin{aligned}
\frac{S_1}{S_2} &= \frac{Z_{L1}[\hat{I}_1(j\sqrt{3})] - [\hat{I}_1(2hZ_{L1} + Z_{S1})(\sqrt{3}\angle 30^\circ) + \hat{I}_1(Z_{S1})(\sqrt{3}\angle -30^\circ)]}{\hat{I}_1(2hZ_{L1} + Z_{S1})(\sqrt{3}\angle 30^\circ)} \\
&= \frac{Z_{L1}(j) - [(2hZ_{L1} + Z_{S1})(1\angle 30^\circ) + (Z_{S1})(1\angle -30^\circ)]}{(2hZ_{L1} + Z_{S1})(1\angle 30^\circ)} \\
&= \frac{Z_{L1} - [(2hZ_{L1} + Z_{S1})(1\angle -60^\circ) + (Z_{S1})(1\angle -120^\circ)]}{(2hZ_{L1} + Z_{S1})(1\angle -60^\circ)} \\
&= \frac{Z_{L1} - [(2hZ_{L1})(1\angle -60^\circ) + Z_{S1}(-j\sqrt{3})]}{(2hZ_{L1})(1\angle -60^\circ) + Z_{S1}(1\angle -60^\circ)} \\
&= \frac{Z_{L1} - [(2hZ_{L1})(1\angle -60^\circ) + Z_{S1}(-j\sqrt{3})]}{[(2hZ_{L1})(1\angle -60^\circ) + Z_{S1}(-j\sqrt{3})] - Z_{S1}(1\angle -120^\circ)}.
\end{aligned} \tag{3.6d}$$

Portanto, com base na relação expressa na Equação 3.1, tem-se:

$$\begin{aligned}
\bar{a} &= Z_{L1} \\
\bar{b} &= Z_{S1}(1\angle -120^\circ) = Z_{S1} \left[ -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}j \right].
\end{aligned} \tag{3.6e}$$

Realizou-se a mesma análise para a unidade de impedância  $Z_{CA}$  ainda considerando uma falta bifásica BC, de acordo com a demonstração a seguir.

Sinal de Operação,

$$\begin{aligned}
S_1 &= Z_{L1}\hat{I}_{CA} - \hat{V}_{CA} \\
&= Z_{L1}(\hat{I}_C - \hat{I}_A) - (\hat{V}_C - \hat{V}_A) \\
&= Z_{L1}[(a\hat{I}_1 + a^2\hat{I}_2 + \hat{I}_0) - (\hat{I}_1 + \hat{I}_2 + \hat{I}_0)] \\
&\quad - [(a\hat{V}_1 + a^2\hat{V}_2 + \hat{V}_0) - (\hat{V}_1 + \hat{V}_2 + \hat{V}_0)] \\
&= Z_{L1}[\hat{I}_1(a - 1) + \hat{I}_2(a^2 - 1)] - [\hat{V}_1(a - 1) + \hat{V}_2(a^2 - 1)] \\
&= Z_{L1}\hat{I}_1[(\sqrt{3}\angle 150^\circ) + (\sqrt{3}\angle 30^\circ)] \\
&\quad - [\hat{I}_1(2hZ_{L1} + Z_{S1})(\sqrt{3}\angle 150^\circ) + \hat{I}_1Z_{S1}(\sqrt{3}\angle -150^\circ)],
\end{aligned} \tag{3.7a}$$

assumindo-se as mesmas considerações exibidas na Equação 3.6b.

Sinal de Polarização,

$$\begin{aligned}
 S_2 &= \hat{V}_{CA1} = \hat{V}_{C1} - \hat{V}_{A1} \\
 &= a\hat{V}_1 - \hat{V}_1 = \hat{V}_1(a - 1) = \hat{V}_1(\sqrt{3}\angle 150^\circ) \\
 &= \hat{I}_1(2hZ_{L1} + Z_{S1})(\sqrt{3}\angle 150^\circ).
 \end{aligned} \tag{3.7b}$$

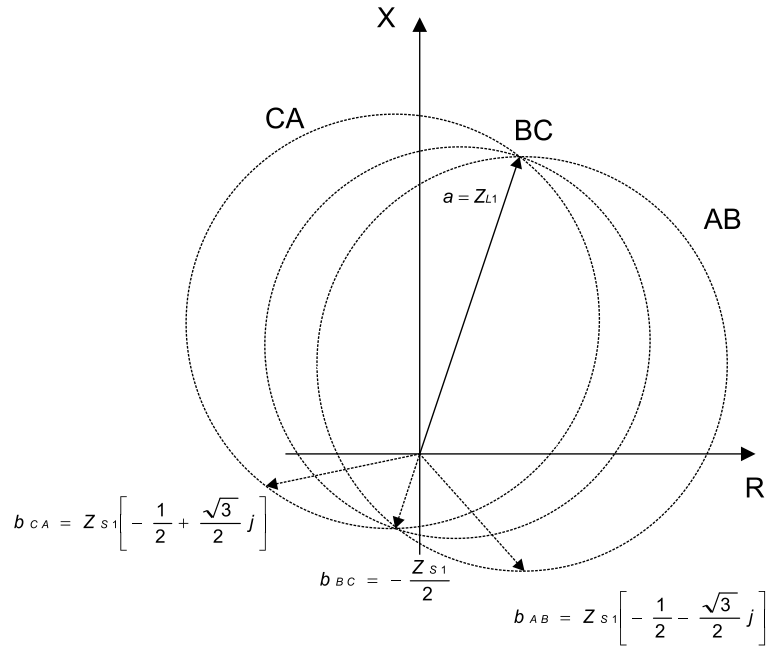
Dessa forma, tem-se:

$$\begin{aligned}
 \frac{S_1}{S_2} &= \frac{Z_{L1}\hat{I}_1[(\sqrt{3}\angle 150^\circ) + (\sqrt{3}\angle 30^\circ)] - [\hat{I}_1(2hZ_{L1} + Z_{S1})(\sqrt{3}\angle 150^\circ) + \hat{I}_1Z_{S1}(\sqrt{3}\angle -150^\circ)]}{\hat{I}_1(2hZ_{L1} + Z_{S1})(\sqrt{3}\angle 150^\circ)} \\
 &= \frac{Z_{L1}[j] - [(2hZ_{L1} + Z_{S1})(1\angle 150^\circ) + Z_{S1}(1\angle -150^\circ)]}{(2hZ_{L1} + Z_{S1})(1\angle 150^\circ)} \\
 &= \frac{Z_{L1} - [(2hZ_{L1} + Z_{S1})(1\angle 60^\circ) + Z_{S1}(1\angle 120^\circ)]}{(2hZ_{L1} + Z_{S1})(1\angle 60^\circ) + Z_{S1}(1\angle 120^\circ) - Z_{S1}(1\angle 120^\circ)},
 \end{aligned} \tag{3.7c}$$

logo,

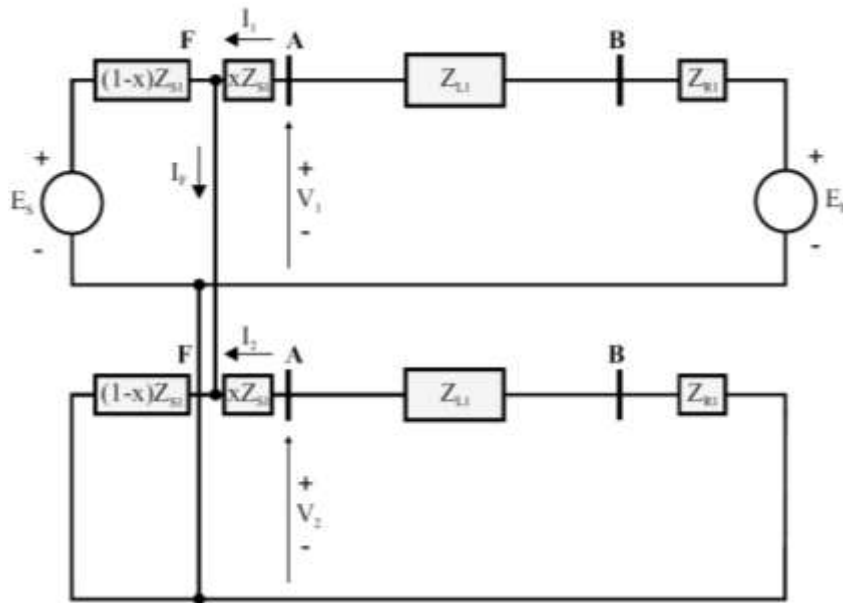
$$\begin{aligned}
 \bar{a} &= Z_{L1} \\
 \bar{b} &= Z_{S1}(1\angle 120^\circ) = -Z_{S1}(1\angle -60^\circ) = Z_{S1}\left[-\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}j\right].
 \end{aligned} \tag{3.7d}$$

Analisando-se as Equações 3.5f, 3.6e, 3.7d, é possível verificar uma correlação entre as expressões obtidas para os vetores de expansão  $\bar{b}$ , que diz respeito ao termo  $-\frac{Z_{S1}}{2}$ . Nota-se que na unidade de impedância afetada pela falta BC, constata-se uma expansão da característica de operação dada apenas pelo termo  $-\frac{Z_{S1}}{2}$ , enquanto que nas unidades de impedância  $Z_{AB}$  e  $Z_{CA}$ , tem-se além do termo  $-\frac{Z_{S1}}{2}$ , uma adição dos  $\frac{-Z_{S1}\sqrt{3}}{2}j$  e  $\frac{Z_{S1}\sqrt{3}}{2}j$ , respectivamente. Sugerindo que, além das unidades de impedância não afetadas pela falta apresentarem dinamismo em suas características de operação, também revela que tais características têm seus vetores de expansão correlacionados entre si para um determinado tipo de falta, neste caso em particular, um curto bifásico BC conforme indicado na Figura 3.9.



**Figura 3.9.** Característica mho dinâmica das unidades de impedância  $Z_{AB}$ ,  $Z_{BC}$  e  $Z_{CA}$ , durante uma falta bifásica à frente entre as fases B e C (regime permanente).

A análise da característica mho dinâmica para faltas bifásicas reversas pode ser feita de forma análoga ao modelo apresentado para as faltas trifásicas reversas, conforme exposto a seguir.



**Figura 3.10.** Circuitos de sequência para uma falta bifásica BC reversa.

Sinal de Operação,

$$\begin{aligned}
S_1 &= Z_{L1} \hat{I}_{BC} - \hat{V}_{BC} \\
&= Z_{L1} [\hat{I}_1(-j\sqrt{3}) + \hat{I}_2(j\sqrt{3})] - [\hat{V}_1(-j\sqrt{3}) + \hat{V}_2(j\sqrt{3})] \\
&= Z_{L1} [C_{R1} \hat{I}_F(-j\sqrt{3}) + C_{R1} \hat{I}_F(-j\sqrt{3})] \\
&\quad - [C_{R1} \hat{I}_F(2xZ_{S1} + Z_{L1} + Z_{R1})(-j\sqrt{3}) + C_{R1} \hat{I}_F(Z_{L1} + Z_{R1})(j\sqrt{3})] \\
&= Z_{L1} [2C_{R1} \hat{I}_F(-j\sqrt{3})] - [C_{R1} \hat{I}_F(2xZ_{S1})(-j\sqrt{3})],
\end{aligned} \tag{3.8a}$$

sendo,

$$\begin{aligned}
C_{R1} &= C_{R2} = \frac{(1-x)Z_{S1}}{Z_{S1} + Z_{L1} + Z_{R1}} \\
\hat{V}_1 &= C_{R1} \hat{I}_F(2xZ_{S1} + Z_{L1} + Z_{R1}) \\
\hat{V}_2 &= C_{R1} \hat{I}_F(Z_{L1} + Z_{R1}) \\
\hat{I}_1 &= C_{R1} \hat{I}_F \\
\hat{I}_2 &= -C_{R1} \hat{I}_F.
\end{aligned} \tag{3.8b}$$

Sinal de Polarização,

$$\begin{aligned}
S_2 &= \hat{V}_{BC1} = \hat{V}_{B1} - \hat{V}_{C1} = (-j\sqrt{3}) \hat{V}_1 \\
&= (-j\sqrt{3}) C_{R1} \hat{I}_F(2xZ_{S1} + Z_{L1} + Z_{R1}).
\end{aligned} \tag{3.8c}$$

A partir dos sinais de operação e polarização tem-se que:

$$\begin{aligned}
\frac{\frac{S_1}{C_{R1} \hat{I}_F}}{\frac{S_2}{C_{R1} \hat{I}_F}} &= \frac{Z_{L1} [2(-j\sqrt{3})] - [2xZ_{S1}(-j\sqrt{3})]}{(-j\sqrt{3})(2xZ_{S1} + Z_{L1} + Z_{R1})} \\
&= \frac{2Z_{L1} - 2xZ_{S1}}{2xZ_{S1} + Z_{L1} + Z_{R1}} = \frac{Z_{L1} - xZ_{S1}}{xZ_{S1} + \frac{Z_{L1} + Z_{R1}}{2}}.
\end{aligned} \tag{3.8d}$$

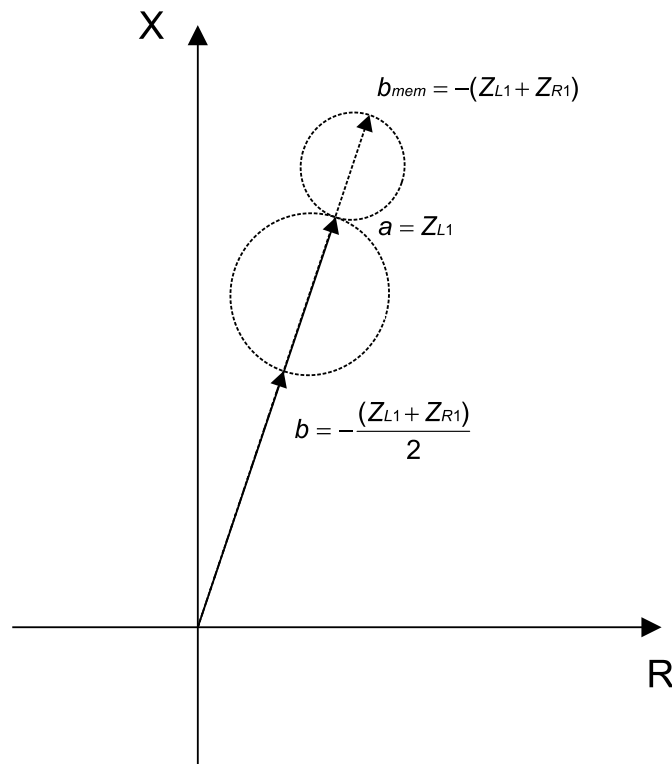


Logo,

$$\begin{aligned}\bar{a} &= Z_{L1} \\ \bar{b} &= \frac{-(Z_{L1} + Z_{R1})}{2}.\end{aligned}\tag{3.8e}$$

Com base no resultado verificado para o vetor de expansão  $\bar{b}$  durante as faltas bifásicas reversas, pode-se evidenciar que para esses tipos de falta a impedância da fonte vista pelo relé passa a ser igual a  $Z_{L1} + Z_{R1}$ . Isso corresponde à impedância da linha de transmissão acrescida da impedância de sequência positiva da fonte remota.

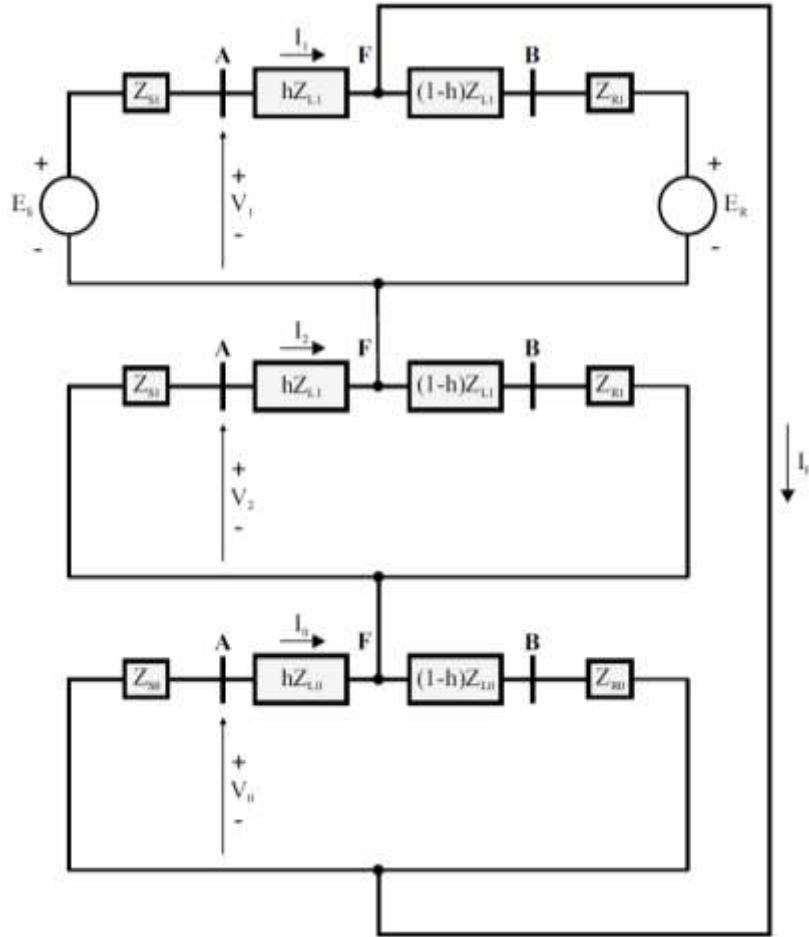
O comportamento da característica dinâmica durante faltas bifásicas reversas pode ser visto na Figura 3.11 a seguir.



**Figura 3. 11.** Característica mho dinâmica durante falta bifásica reversa.

### 3.4 FALTA MONOFÁSICA

A partir da análise do circuito da Figura 3.12, é possível examinar a expansão da característica mho dinâmica para uma falta monofásica envolvendo a fase A.



**Figura 3.12.** Circuitos de sequência para uma falta monofásica na fase A à frente.

Sinal de Operação,

$$\begin{aligned}
 S_1 &= Z_{L1}(\hat{I}_A + 3k_0\hat{I}_0) - \hat{V}_A \\
 &= Z_{L1}[\hat{I}_0 + \hat{I}_1 + \hat{I}_2 + 3k_0\hat{I}_0] - [\hat{V}_1 + \hat{V}_2 + \hat{V}_0] \\
 &= Z_{L1}\left[C_0\hat{I}_F + 2C_1\hat{I}_F + C_0\hat{I}_F\left(\frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}}\right)\right] \\
 &\quad - [C_1\hat{I}_F(2hZ_{L1}) + C_0\hat{I}_F(hZ_{L0})],
 \end{aligned} \tag{3.9a}$$

sendo,

$$\begin{aligned}
C_0 &= \frac{(1-h)Z_{L0} + Z_{R0}}{Z_{S0} + Z_{L0} + Z_{R0}} \\
C_1 = C_2 &= \frac{(1-h)Z_{L1} + Z_{R1}}{Z_{S1} + Z_{L1} + Z_{R1}} \\
\hat{V}_0 &= -(C_0 \hat{I}_F Z_{S0}) \\
\hat{V}_1 &= C_1 \hat{I}_F (2hZ_{L1} + Z_{S1}) + C_0 \hat{I}_F (Z_{S0} + hZ_{L0}) \\
\hat{V}_2 &= -(C_1 \hat{I}_F Z_{S1}) \\
\hat{I}_0 &= C_0 \hat{I}_F \\
\hat{I}_1 = \hat{I}_2 &= C_1 \hat{I}_F .
\end{aligned} \tag{3.9b}$$

Nota-se que para faltas monofásicas, a característica dinâmica é influenciada pelo fator de compensação de corrente  $k_0$ , dado por (CALERO, 2009):

$$k_0 = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{3Z_{L1}} . \tag{3.9c}$$

Sinal de Polarização,

$$S_2 = \hat{V}_1 = C_1 \hat{I}_F (2hZ_{L1} + Z_{S1}) + C_0 \hat{I}_F (Z_{S0} + hZ_{L0}) . \tag{3.9d}$$

Portanto,

$$\begin{aligned}
\frac{\frac{S_1}{\hat{I}_F}}{\frac{S_2}{\hat{I}_F}} &= \frac{Z_{L1} \left[ 2C_1 + C_0 \frac{Z_{L0}}{Z_{L1}} \right] - [C_1 2hZ_{L1} + C_0 hZ_{L0}]}{C_1 (2hZ_{L1} + Z_{S1}) + C_0 (Z_{S0} + hZ_{L0})} \\
&= \frac{Z_{L1} \left[ 2C_1 + C_0 \frac{Z_{L0}}{Z_{L1}} \right] - hZ_{L1} [2C_1 + C_0 \frac{Z_{L0}}{Z_{L1}}]}{hZ_{L1} \left[ 2C_1 + C_0 \frac{Z_{L0}}{Z_{L1}} \right] + Z_{S1} [C_1 + C_0 \frac{Z_{S0}}{Z_{S1}}]} .
\end{aligned} \tag{3.9e}$$

$$\bar{a} = Z_{L1}$$

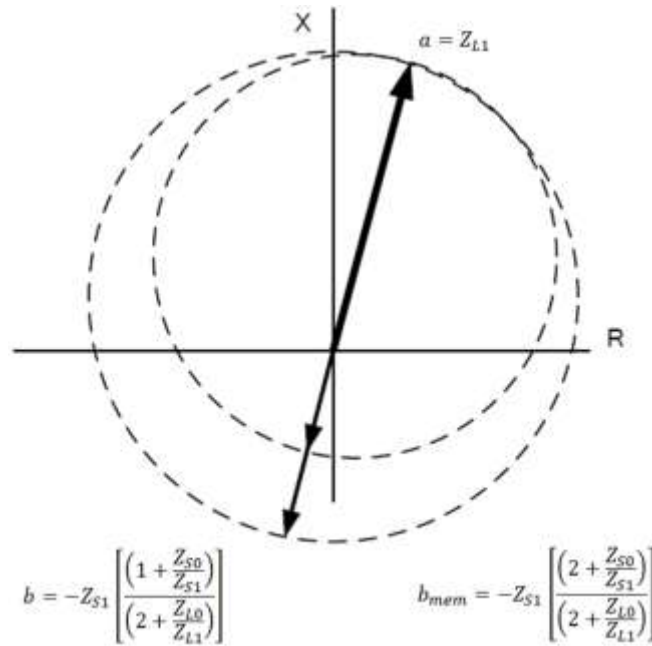
$$\bar{b} = -Z_{S1} \left[ \frac{C_1 + C_0 \frac{Z_{S0}}{Z_{S1}}}{2C_1 + C_0 \frac{Z_{L0}}{Z_{L1}}} \right] . \tag{3.9f}$$

Assumindo  $C_0 = C_1$ ,  $\bar{a}$  e  $\bar{b}$  adquirem os seguintes valores:

$$\bar{a} = Z_{L1}$$

$$\bar{b} = -Z_{S1} \left[ \frac{1 + \frac{Z_{S0}}{Z_{S1}}}{2 + \frac{Z_{L0}}{Z_{L1}}} \right]. \quad (3.9g)$$

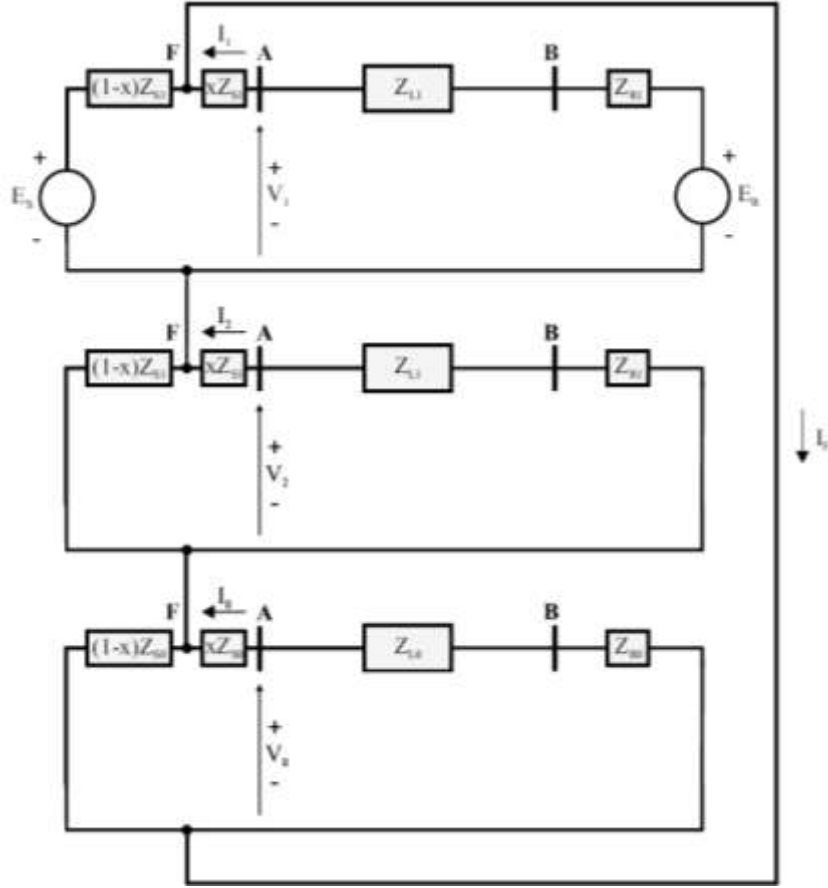
O vetor de expansão  $\bar{b}$  verificado sugere que a expansão da característica mho, para uma falta fase-terra, oferece uma melhor cobertura para impedâncias de falta. A Figura 3.13 ilustra esse comportamento de grande relevância em se tratando de faltas à terra (FENTIE, 2016).



**Figura 3.13.** Característica mho dinâmica durante falta fase-terra (CALERO, 2009).

É possível notar inclusive que a expansão máxima dada por  $\bar{b}_{mem}$  tem magnitude igual a  $Z_{S1}$  em sistemas onde os ângulos e razões entre  $Z_{S0}$ ,  $Z_{S1}$  e  $Z_{L0}$ ,  $Z_{L1}$  são iguais (FENTIE, 2016).

Pode-se analisar a característica mho dinâmica para os casos de falta à terra reversa a partir da determinação dos vetores de alcance e expansão, conforme apresentado a seguir.



**Figura 3.14.** Circuitos de sequência para uma falta monofásica na fase A reversa.

Sinal de Operação,

$$\begin{aligned}
 S_1 &= Z_{L1}(\hat{I}_A + 3k_0\hat{I}_0) - \hat{V}_A \\
 &= Z_{L1} \left[ \hat{I}_0 + \hat{I}_1 + \hat{I}_2 + \left( \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}} \right) \hat{I}_0 \right] - [\hat{V}_1 + \hat{V}_2 + \hat{V}_0] \\
 &= Z_{L1} \left[ 2C_{R1}\hat{I}_F + C_{R0}\hat{I}_F + \left( \frac{Z_{L0}}{Z_{L1}} - 1 \right) C_{R0}\hat{I}_F \right] \\
 &\quad - [C_{R1}\hat{I}_F(2xZ_{S1}) + C_{R0}\hat{I}_F(xZ_{S0})],
 \end{aligned} \tag{3.10a}$$

sendo,

$$\begin{aligned}
C_{R0} &= \frac{(1-x)Z_{S0}}{Z_{S0} + Z_{L0} + Z_{R0}} \\
C_{R1} &= C_{R2} = \frac{(1-x)Z_{S1}}{Z_{S1} + Z_{L1} + Z_{R1}} \\
\hat{V}_0 &= -C_{R0}\hat{I}_F(Z_{L0} + Z_{R0}) \\
\hat{V}_1 &= C_{R1}\hat{I}_F(2xZ_{S1} + Z_{L1} + Z_{R1}) + C_{R0}\hat{I}_F(xZ_{S0} + Z_{L0} + Z_{R0}) \\
\hat{V}_2 &= -C_{R1}\hat{I}_F(Z_{L1} + Z_{R1}) \\
\hat{I}_0 &= C_{R0}\hat{I}_F \\
\hat{I}_1 &= \hat{I}_2 = C_{R1}\hat{I}_F.
\end{aligned} \tag{3.10b}$$

Sinal de Polarização,

$$S_2 = \hat{V}_1 = C_{R1}\hat{I}_F(2xZ_{S1} + Z_{L1} + Z_{R1}) + C_{R0}\hat{I}_F(xZ_{S0} + Z_{L0} + Z_{R0}). \tag{3.10c}$$

Portanto,

$$\begin{aligned}
\frac{\frac{S_1}{\hat{I}_F}}{\frac{S_2}{\hat{I}_F}} &= \frac{Z_{L1} \left[ 2C_{R1} + C_{R0} + \left( \frac{Z_{L0}}{Z_{L1}} - 1 \right) C_{R0} \right] - [C_{R1}2xZ_{S1} + C_{R0}xZ_{S0}]}{C_{R1}(2xZ_{S1} + Z_{L1} + Z_{R1}) + C_{R0}(xZ_{S0} + Z_{L0} + Z_{R0})} \\
&= \frac{Z_{L1} \left[ 2C_{R1} + \frac{Z_{L0}}{Z_{L1}} C_{R0} \right] - xZ_{S1} \left[ 2C_{R1} + C_{R0} \frac{Z_{S0}}{Z_{S1}} \right]}{xZ_{S1} \left[ 2C_{R1} + C_{R0} \frac{Z_{S0}}{Z_{S1}} \right] + [C_{R1}(Z_{L1} + Z_{R1}) + C_{R0}(Z_{L0} + Z_{R0})]} \\
&= \frac{Z_{L1} \frac{[2C_{R1} + C_{R0} \frac{Z_{L0}}{Z_{L1}}]}{[2C_{R1} + C_{R0} \frac{Z_{S0}}{Z_{S1}}]} - xZ_{S1}}{xZ_{S1} + \frac{[C_{R1}(Z_{L1} + Z_{R1}) + C_{R0}(Z_{L0} + Z_{R0})]}{[2C_{R1} + C_{R0} \frac{Z_{S0}}{Z_{S1}}]}}.
\end{aligned} \tag{3.10d}$$

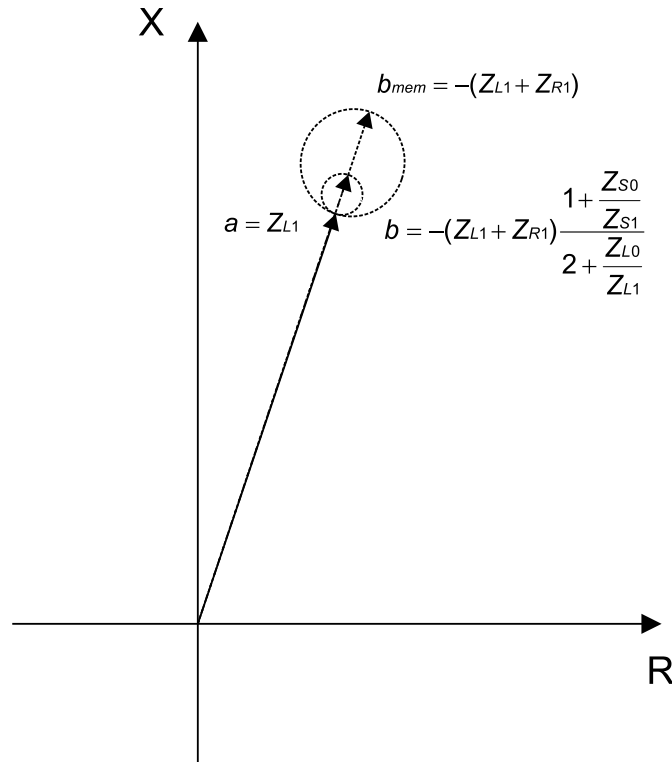
$$\bar{a} = Z_{L1} \frac{[2C_{R1} + C_{R0} \frac{Z_{L0}}{Z_{L1}}]}{[2C_{R1} + C_{R0} \frac{Z_{S0}}{Z_{S1}}]} \tag{3.10e}$$

$$\bar{b} = - \frac{[C_{R1}(Z_{L1} + Z_{R1}) + C_{R0}(Z_{L0} + Z_{R0})]}{[2C_{R1} + C_{R0} \frac{Z_{S0}}{Z_{S1}}]}.$$

Assumindo  $\frac{Z_{L0}}{Z_{L1}} = \frac{Z_{S0}}{Z_{S1}} = \frac{Z_{R0}}{Z_{R1}}$  e  $C_{R1} = C_{R0}$ , têm-se os seguintes vetores  $\bar{a}$  e  $\bar{b}$ :

$$\begin{aligned}\bar{a} &= Z_{L1} \\ \bar{b} &= -(Z_{L1} + Z_{R1}) \left[ \frac{1 + \frac{Z_{S0}}{Z_{S1}}}{2 + \frac{Z_{L0}}{Z_{L1}}} \right].\end{aligned}\quad (3.10f)$$

Da mesma forma que se observou para faltas monofásicas à frente, tem-se que nas faltas monofásicas reversas a característica mho dinâmica adquire uma dimensão diferente da característica mho autopolarizada em regime permanente de falta. Entretanto, durante uma falta reversa verifica-se um encolhimento na característica de operação, conforme exibido na Figura 3.15.

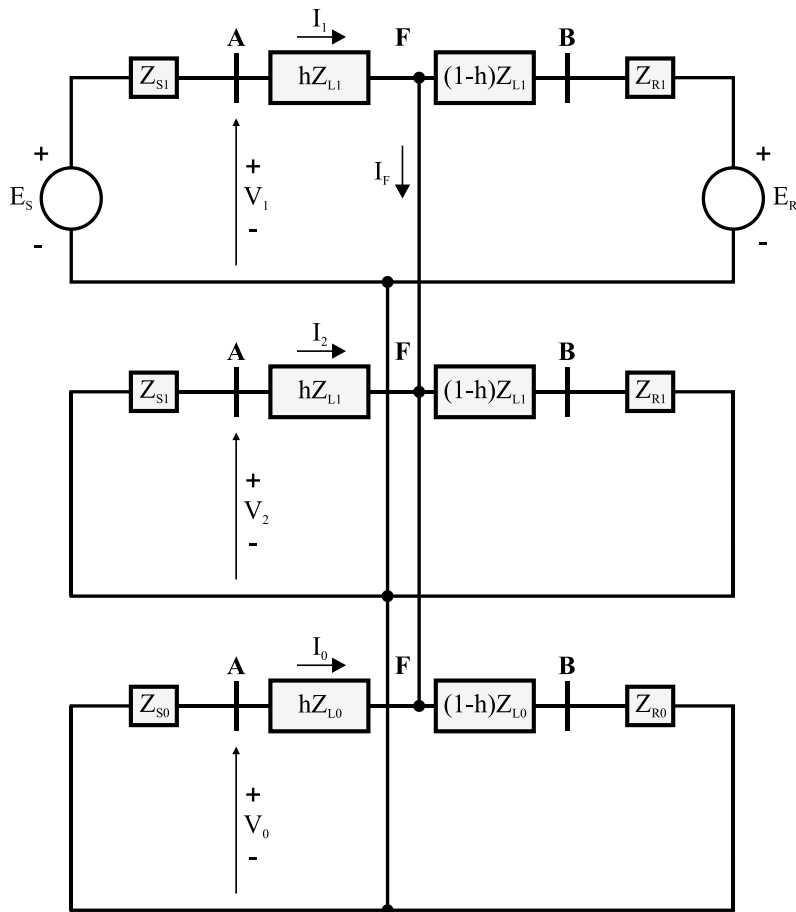


**Figura 3. 15.** Característica mho dinâmica durante falta monofásica reversa.

### 3.5 FALTA BIFÁSICA-TERRA

Assim como nas demais faltas analisadas até este ponto, o vetor de expansão da característica mho dinâmica, durante uma falta bifásica-terra à frente do relé, também depende da impedância da fonte  $Z_{S1}$ . A detecção de faltas bifásica-terra fica a critério do projetista, uma vez que elas podem ser consideradas como faltas a terra, devido ao envolvimento do retorno proveniente da terra, bem como falta entre fases, devido a sua natureza multifásica. A seleção do design é uma opção do fabricante (CALERO, 2015).

A Figura 3.16 contém os circuitos de sequência que permitem a análise de uma falta bifásica-terra entre as fases B e C à frente do terminal do relé.



**Figura 3.16.** Circuitos de seqüência para uma falta bifásica-terra BCT à frente.

Em regime permanente de falta, o círculo dinâmico pode ser compreendido a partir das seguintes deduções:



Sinal de Operação,

$$\begin{aligned}
S_1 &= Z_{L1} \hat{I}_{BC} - \hat{V}_{BC} = Z_{L1} (\hat{I}_B - \hat{I}_C) - (\hat{V}_B - \hat{V}_C) \\
&= Z_{L1} [a^2 \hat{I}_1 + a \hat{I}_2 + \hat{I}_0 - (a \hat{I}_1 + a^2 \hat{I}_2 + \hat{I}_0)] \\
&\quad - [a^2 \hat{V}_1 + a \hat{V}_2 + \hat{V}_0 - (a \hat{V}_1 + a^2 \hat{V}_2 + \hat{V}_0)] \\
&= Z_{L1} [\hat{I}_1 (-j\sqrt{3}) + \hat{I}_2 (j\sqrt{3})] - [\hat{V}_1 (-j\sqrt{3}) + \hat{V}_2 (j\sqrt{3})] \\
&= Z_{L1} [C_1 \hat{I}_F + \alpha_2 \hat{I}_F C_1] (-j\sqrt{3}) \\
&\quad - [C_1 \hat{I}_F (hZ_{L1}) + \alpha_2 \hat{I}_F C_1 (Z_{S1} + hZ_{L1})] (-j\sqrt{3}) \\
&\quad - [\alpha_2 \hat{I}_F C_1 Z_{S1}] (j\sqrt{3}),
\end{aligned} \tag{3.11a}$$

sendo,

$$\begin{aligned}
C_1 &= C_2 = \frac{(1-h)Z_{L1} + Z_{R1}}{Z_{S1} + Z_{L1} + Z_{R1}} \\
\alpha_2 &= \frac{Z_{S0} + hZ_{L0}}{Z_{S1} + hZ_{L1} + Z_{S0} + hZ_{L0}} \\
\hat{V}_1 &= \hat{I}_1 (hZ_{L1}) - \hat{I}_2 (Z_{S1} + hZ_{L1}) \\
\hat{V}_2 &= -\hat{I}_2 Z_{S1} \\
\hat{I}_1 &= C_1 \hat{I}_F \\
\hat{I}_2 &= -\alpha_2 \hat{I}_F C_1.
\end{aligned} \tag{3.11b}$$

Sinal de Polarização,

$$\begin{aligned}
S_2 &= \hat{V}_{BC1} = \hat{V}_{B1} - \hat{V}_{C1} = (-j\sqrt{3}) \hat{V}_1 \\
&= (-j\sqrt{3}) [C_1 \hat{I}_F (hZ_{L1}) + \alpha_2 \hat{I}_F C_1 (Z_{S1} + hZ_{L1})].
\end{aligned} \tag{3.11c}$$

Portanto,

$$\begin{aligned}
\frac{\frac{S_1}{\hat{I}_F (-j\sqrt{3})}}{\frac{S_2}{\hat{I}_F (-j\sqrt{3})}} &= \frac{Z_{L1} [C_1 + \alpha_2 C_1] - hZ_{L1} [C_1 + \alpha_2 C_1]}{hZ_{L1} [C_1 + C_1 \alpha_2] + Z_{S1} [\alpha_2 C_1]} \\
&= \frac{Z_{L1} - hZ_{L1}}{hZ_{L1} + \frac{Z_{S1} [\alpha_2 C_1]}{[C_1 + C_1 \alpha_2]}}.
\end{aligned} \tag{3.11d}$$

Dessa forma, determinam-se os vetores de alcance e de expansão da característica mho dinâmica com base na relação expressa pela Equação 3.1.

$$\bar{a} = Z_{L1} \quad (3.11e)$$

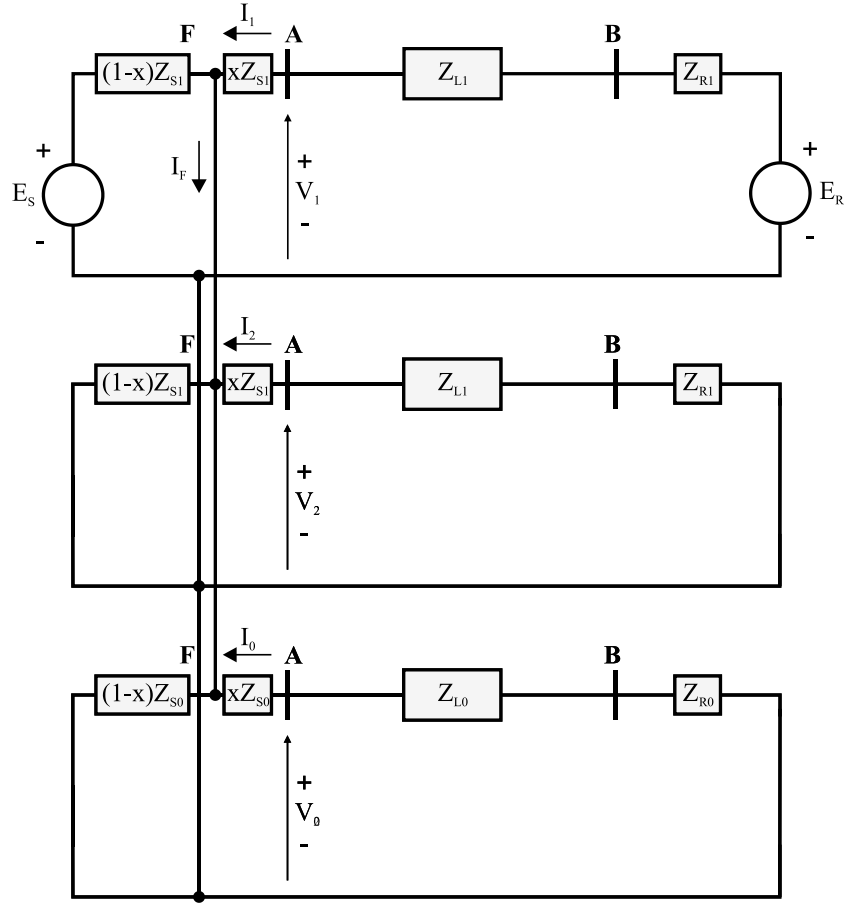
$$\begin{aligned} \bar{b} &= -\frac{Z_{S1}[\alpha_2 C_1]}{[C_1 + C_1 \alpha_2]} = -Z_{S1} \frac{\alpha_2}{1 + \alpha_2} = -Z_{S1} \frac{1}{\frac{1}{\alpha_2} + 1} \\ &= -Z_{S1} \left[ \frac{1}{\frac{Z_{S1} + hZ_{L1} + Z_{S0} + hZ_{L0}}{Z_{S0} + hZ_{L0}} + 1} \right] \\ &= -Z_{S1} \left[ \frac{Z_{S0} + hZ_{L0}}{Z_{S1} + hZ_{L1} + 2Z_{S0} + 2hZ_{L0}} \right]. \end{aligned} \quad (3.11f)$$

Conforme se pode verificar, a dedução do vetor de expansão  $\bar{b}$ , em regime permanente, para o caso de uma falta bifásica-terra, é significativamente mais complexa que nos demais tipos de falta. Uma vez que a expansão depende, além da rede de sequência zero, da localização da falta ao longo da linha de transmissão (FENTIE, 2016).

De forma análoga às faltas reversas anteriormente analisadas, pode-se também examinar faltas reversas BCT, a partir da Figura 3.17, conforme apresentado adiante.

Sinal de Operação,

$$\begin{aligned} S_1 &= Z_{L1} \hat{I}_{BC} - \hat{V}_{BC} = Z_{L1} (\hat{I}_B - \hat{I}_C) - (\hat{V}_B - \hat{V}_C) \\ &= Z_{L1} [a^2 \hat{I}_1 + a \hat{I}_2 + \hat{I}_0 - (a \hat{I}_1 + a^2 \hat{I}_2 + \hat{I}_0)] \\ &\quad - [a^2 \hat{V}_1 + a \hat{V}_2 + \hat{V}_0 - (a \hat{V}_1 + a^2 \hat{V}_2 + \hat{V}_0)] \\ &= Z_{L1} [\hat{I}_1(-j\sqrt{3}) + \hat{I}_2(j\sqrt{3})] - [\hat{V}_1(-j\sqrt{3}) + \hat{V}_2(j\sqrt{3})] \\ &= Z_{L1} [C_{R1} \hat{I}_F(-j\sqrt{3}) + \hat{I}_F \alpha_2 C_{R1}(-j\sqrt{3})] \\ &\quad - (-j\sqrt{3}) [C_{R1} \hat{I}_F(xZ_{S1}) + \hat{I}_F \alpha_2 C_{R1}(xZ_{S1} + Z_{L1} + Z_{R1})] \\ &\quad + (-j\sqrt{3}) [\hat{I}_F \alpha_2 C_{R1}(Z_{L1} + Z_{R1})]. \end{aligned} \quad (3.12a)$$



**Figura 3.17.** Circuitos de sequência para uma falta bifásica-terra BCT reversa.

sendo,

$$\begin{aligned}
 C_{R1} &= C_{R2} = \frac{(1-x)Z_{S1}}{Z_{S1} + Z_{L1} + Z_{R1}} \\
 \alpha_2 &= \frac{xZ_{S0} + Z_{L0} + Z_{R0}}{xZ_{S1} + Z_{L1} + Z_{R1} + xZ_{S0} + Z_{L0} + Z_{R0}} \\
 \hat{V}_1 &= C_{R1} \hat{I}_F (xZ_{S1}) + \alpha_2 \hat{I}_F C_{R1} (xZ_{S1} + Z_{L1} + Z_{R1}) \\
 \hat{V}_2 &= \alpha_2 \hat{I}_F C_{R1} (Z_{L1} + Z_{R1}) \\
 \hat{I}_1 &= C_{R1} \hat{I}_F \\
 \hat{I}_2 &= -\alpha_2 \hat{I}_F C_{R1} .
 \end{aligned} \tag{3.12b}$$

Sinal de Polarização,

$$\begin{aligned} S_2 &= \hat{V}_{BC1} = \hat{V}_{B1} - \hat{V}_{C1} = (-j\sqrt{3})\hat{V}_1 \\ &= (-j\sqrt{3})[C_{R1}\hat{I}_F(xZ_{S1}) + \hat{I}_F \alpha_2 C_{R1}(xZ_{S1} + Z_{L1} + Z_{R1})] . \end{aligned} \quad (3.12c)$$

Simplificando alguns termos obtêm-se:

$$\begin{aligned} \frac{S_1}{\hat{I}_F(-j\sqrt{3})} &= Z_{L1}[C_{R1} + \alpha_2 C_{R1}] \\ &\quad - [C_{R1}(xZ_{S1}) + \alpha_2 C_{R1}(xZ_{S1} + Z_{L1} + Z_{R1})] \\ &\quad + [\alpha_2 C_{R1}(Z_{L1} + Z_{R1})] \\ &= Z_{L1}[C_{R1} + \alpha_2 C_{R1}] - xZ_{S1}[C_{R1} + \alpha_2 C_{R1}] . \end{aligned} \quad (3.12d)$$

$$\begin{aligned} \frac{S_2}{\hat{I}_F(-j\sqrt{3})} &= [C_{R1}(xZ_{S1}) + \alpha_2 C_{R1}(xZ_{S1} + Z_{L1} + Z_{R1})] \\ &= xZ_{S1}[C_{R1} + \alpha_2 C_{R1}] + \alpha_2 C_{R1}(Z_{L1} + Z_{R1}) . \end{aligned} \quad (3.12e)$$

A partir disso, determinam-se os vetores  $\bar{a}$  e  $\bar{b}$ .

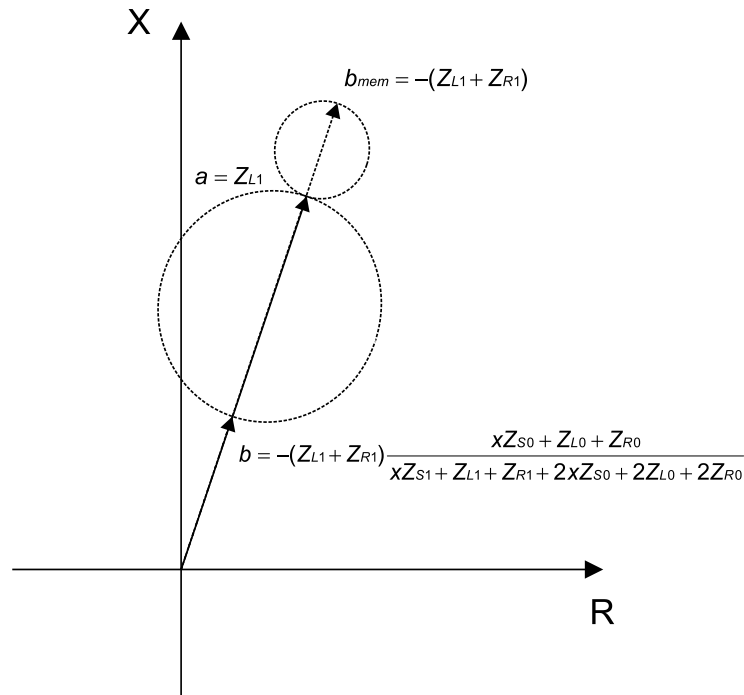
$$\begin{aligned} \frac{\frac{S_1}{\hat{I}_F(-j\sqrt{3})}}{\frac{S_2}{\hat{I}_F(-j\sqrt{3})}} &= \frac{Z_{L1}[C_{R1} + \alpha_2 C_{R1}] - xZ_{S1}[C_{R1} + \alpha_2 C_{R1}]}{xZ_{S1}[C_{R1} + \alpha_2 C_{R1}] + \alpha_2 C_{R1}[Z_{L1} + Z_{R1}]} \\ &= \frac{Z_{L1} - xZ_{S1}}{xZ_{S1} + [Z_{L1} + Z_{R1}] \frac{\alpha_2}{[1 + \alpha_2]}} . \end{aligned} \quad (3.12f)$$

Com base no modelo indicado pela Equação 3.1, identificam-se os vetores de alcance e de expansão da característica mho dinâmica.

$$\bar{a} = Z_{L1} \quad (3.12g)$$

$$\begin{aligned}
\bar{b} &= -[Z_{L1} + Z_{R1}] \frac{\alpha_2}{[1 + \alpha_2]} \\
&= -[Z_{L1} + Z_{R1}] \frac{1}{\frac{1}{\alpha_2} + 1} \\
&= -[Z_{L1} + Z_{R1}] \frac{1}{\frac{xZ_{S1} + Z_{L1} + Z_{R1} + xZ_{S0} + Z_{L0} + Z_{R0}}{xZ_{S0} + Z_{L0} + Z_{R0}} + 1} \quad (3.12h) \\
&= -[Z_{L1} + Z_{R1}] \frac{xZ_{S0} + Z_{L0} + Z_{R0}}{xZ_{S1} + Z_{L1} + Z_{R1} + 2xZ_{S0} + 2Z_{L0} + 2Z_{R0}}.
\end{aligned}$$

Comparando-se o resultado obtido na Equação 3.12h com a Equação 3.11f, verifica-se claramente que uma falta bifásica-terra reversa se distingue de uma falta à frente do relé pelo fato da impedância da fonte vista pelo relé não ser dada por  $Z_{S1}$ , mas por  $Z_{L1} + Z_{R1}$ , que corresponde à impedância de sequência positiva da linha acrescida da impedância da fonte remota. Além disso, nessas mesmas expressões, onde se obtivera o termo de impedância aparente medida pelo relé  $hZ_{L1}$ , para uma falta à frente, passa-se a obter o termo  $xZ_{S1}$  como sendo o valor da impedância vista pelo relé durante uma falta reversa.



**Figura 3.18.** Característica mho dinâmica durante falta bifásica-terra reversa.

### 3.6 RESUMO

Por fim, apresenta-se na Tabela 3.1, um resumo contendo todos os resultados obtidos para os vetores de expansão  $\bar{b}$  e alcance  $\bar{a}$  em cada um dos tipos de faltas analisadas.

**Tabela 3.1.** Resumo das deduções analíticas.

Tipo de Falta	Fases Envolvidas	Localização	$\bar{a}$	$\bar{b}$
Monofásica	A	Frente	$Z_{L1}$	$-(Z_{S1}) \frac{1 + \frac{Z_{S0}}{Z_{L0}}}{2 + \frac{Z_{S1}}{Z_{L1}}}$
		Reversa	$Z_{L1}$	$-(Z_{L1} + Z_{R1}) \frac{1 + \frac{Z_{S0}}{Z_{L0}}}{2 + \frac{Z_{S1}}{Z_{L1}}}$
Bifásica	B e C	Frente	$Z_{L1}$	$-\frac{Z_{S1}}{2}$
		Reversa	$Z_{L1}$	$-\frac{(Z_{L1} + Z_{R1})}{2}$
Bifásica-Terra	B e C	Frente	$Z_{L1}$	$-(Z_{S1}) \frac{Z_{S0} + hZ_{L0}}{Z_{S1} + hZ_{L1} + 2Z_{S0} + 2hZ_{L0}}$
		Reversa	$Z_{L1}$	$-(Z_{L1} + Z_{R1}) \frac{xZ_{S0} + Z_{L0} + Z_{R0}}{xZ_{S1} + Z_{L1} + Z_{R1} + 2xZ_{S0} + 2Z_{L0} + 2Z_{R0}}$
Trifásica	A, B e C	Frente	$Z_{L1}$	0
		Reversa	$Z_{L1}$	0

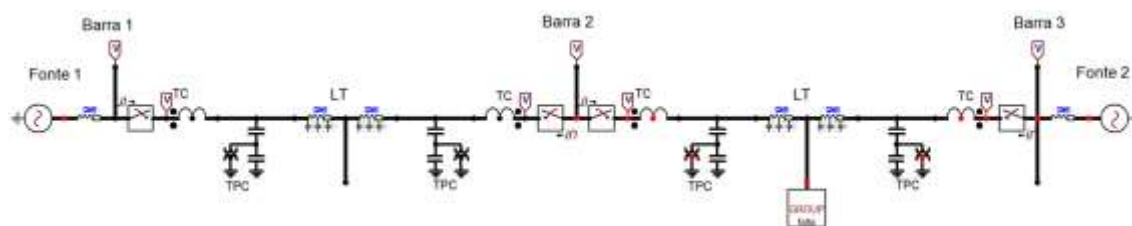
## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

No presente capítulo, será analisado o desempenho da proteção de distância quando implementado comparadores polarizados por memória de tensão de sequência positiva. A fim de se adquirir um melhor entendimento do comportamento da característica mho dinâmica, serão confrontados os resultados obtidos através do modelo de polarização por memória de tensão de sequência positiva com o modelo autopolarizado. Diversos tipos de falta serão explorados com o propósito de validar as deduções exibidas no capítulo 3.

A representação do sistema elétrico a ser analisado será realizada com auxílio do software ATP (*Alternative Transients Program*). Tal programa permite a simulação dos diversos tipos de falta ao longo da linha de transmissão, bem como a leitura dos sinais de tensão e corrente através dos instrumentos de medição nele contidos. Uma vez obtidas essas leituras, faz-se uso do software MATLAB a fim de implementar os algoritmos da proteção de distância do relé.

### 4.1 SISTEMA ANALISADO

A Figura 4.1 contém o diagrama unifilar do sistema analisado. O sistema é composto basicamente por fontes local e remota, duas linhas de transmissão que operam com tensão de linha de 500kV com 200 km de comprimento cada, além de instrumentos de medição como TCs e TPCs,



**Figura 4.1.** Sistema Analisado.

Os TCs utilizados no sistema são do tipo C800 com uma relação de transformação de 1200-5A. Em conjunto com os TPCs, tais dispositivos fornecem medições de corrente e tensão secundários, respectivamente, que serão utilizados na lógica de proteção de distância do relé.

O elemento presente na Figura 4.1 denominado por grupo de falta pode ser configurado para simular curtos-circuitos trifásicos, bifásicos, bifásicos-terra e monofásicos. Isso pode ser feito coordenando o fechamento de chaves posicionadas entre as fases e entre as fases e a terra. Ele também permite a simulação de faltas com alta ou baixa resistência entre as fases e entre cada fase e a terra.

**Tabela 4.1.** Modelo do sistema elétrico utilizado na simulação de faltas.

Linhas de Transmissão	Fonte 1	Fonte 2
200km	$\hat{V}_1 = 500 \angle 0^\circ \text{ kV}$	$\hat{V}_1 = 500 \angle -10^\circ \text{ kV}$
$Z_{L,0} = 0.493 + j1.339 \, \Omega/\text{km}$	$Z_0 = 9.86 + j26.78 \, \Omega$	$Z_0 = 9.86 + j26.78 \, \Omega$
$Y_{L,0} = j2.89 \, \Omega^{-1} / \text{km}$	$Z_1 = 0.372 + j5.34 \, \Omega$	$Z_1 = 0.372 + j5.34 \, \Omega$
$Z_{L,1} = 0.0186 + j0.267 \, \Omega/\text{km}$		
$Y_{L,1} = j6.124 \, \Omega^{-1} / \text{km}$		

Faltas à frente e reversas podem ser simuladas reposicionando-se o elemento de grupo de falta tanto na linha de transmissão protegida quanto na linha de transmissão adjacente, respectivamente. Além disso, a localização da falta pode ser especificada ajustando os devidos parâmetros no software ATP.

Nas simulações realizadas nesta seção, considerou-se o terminal da barra 2 como sendo o local e o terminal da barra 3 como sendo o remoto. Uma vez que as medições utilizadas nos algoritmos implementados no MATLAB advêm dos instrumentos de medição situados imediatamente à direita da barra 2, considerou-se que faltas na linha de transmissão à direita desse terminal corresponderiam à faltas à frente, enquanto que faltas situadas na linha de transmissão à esquerda seriam faltas reversas.



## 4.2 TIPOS DE FALTAS ANALISADAS

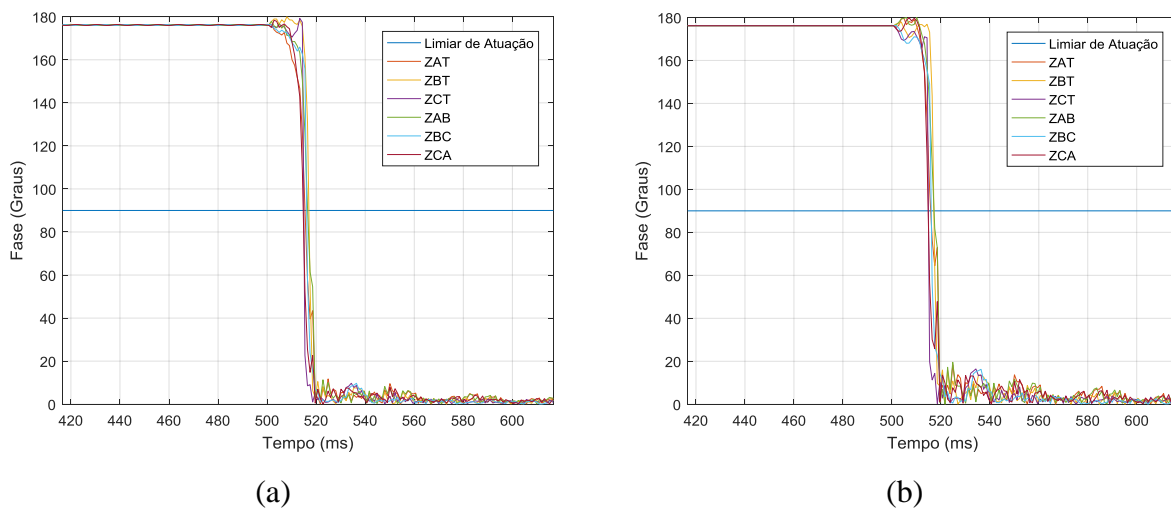
Primeiramente, foram realizadas simulações de quatro diferentes tipos de falta, sendo elas: monofásica (fase A), bifásica (fases B e C), bifásica-terra (fases B e C) e trifásica. Cada uma dessas faltas foi executada tanto à frente quanto atrás do terminal do relé no instante 500 milissegundos.

A fim de evidenciar as diferenças entre a característica mho dinâmica e a característica mho autopolarizada, aplicaram-se faltas próximas ao terminal do relé, em 1% e 2% do comprimento da linha, tanto reversas quanto à frente. Pois nas faltas próximas do terminal do relé a tensão é muito pequena para ser medida com precisão, comprometendo a operação dos comparadores autopolarizados que não apresentam referência de tensão adequada nesses casos.

## 4.3 INFLUÊNCIA DA LOCALIZAÇÃO DA FALTA

A seguir, será avaliada a influência da localização do curto-circuito ao longo da linha de transmissão no desempenho da detecção de faltas utilizando-se as características mho autopolarizada e polarizada por memória de tensão de sequência positiva.

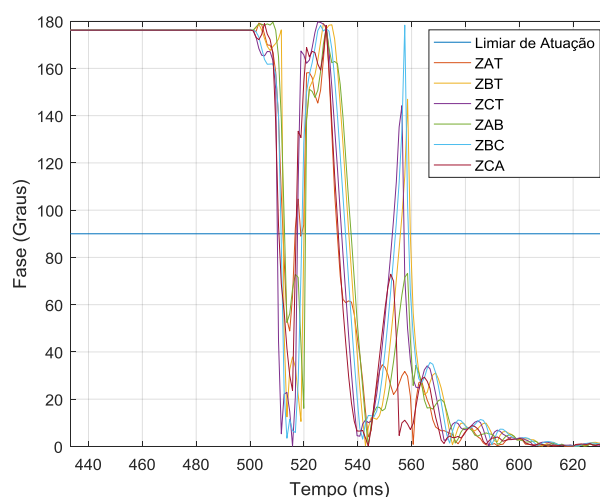
Primeiramente, simulou-se no instante 500 ms uma falta trifásica em 50% da linha protegida a fim de verificar o desempenho das características mho.



**Figura 4.2.** Saída dos comparadores de fase durante falta trifásica à frente em 50% da linha a ser protegida: (a) comparador polarizado por memória de tensão de sequência positiva; (b) comparador autopolarizado.

Verifica-se que ambas as características identificaram corretamente a falta por meio de todas as unidades de impedância, uma vez que se trata de um curto-circuito trifásico. Esse fato era esperado, pois a característica mho autopolarizada apresenta um bom desempenho para faltas que não ocorrem próximas ao terminal do relé, uma vez que ainda se apresentam níveis de tensão confiáveis para serem implementados no comparador de fase.

Entretanto, se o ponto de incidência da falta for deslocado para uma região mais próxima do relé, passa-se a evidenciar significativas diferenças quanto ao desempenho entre a característica mho autopolarizada e a polarizada por memória de tensão de sequência positiva. A Figura 4.3 ilustra o desempenho da característica mho autopolarizada na detecção de faltas em virtude da aproximação da falta para 1% da linha a ser protegida.

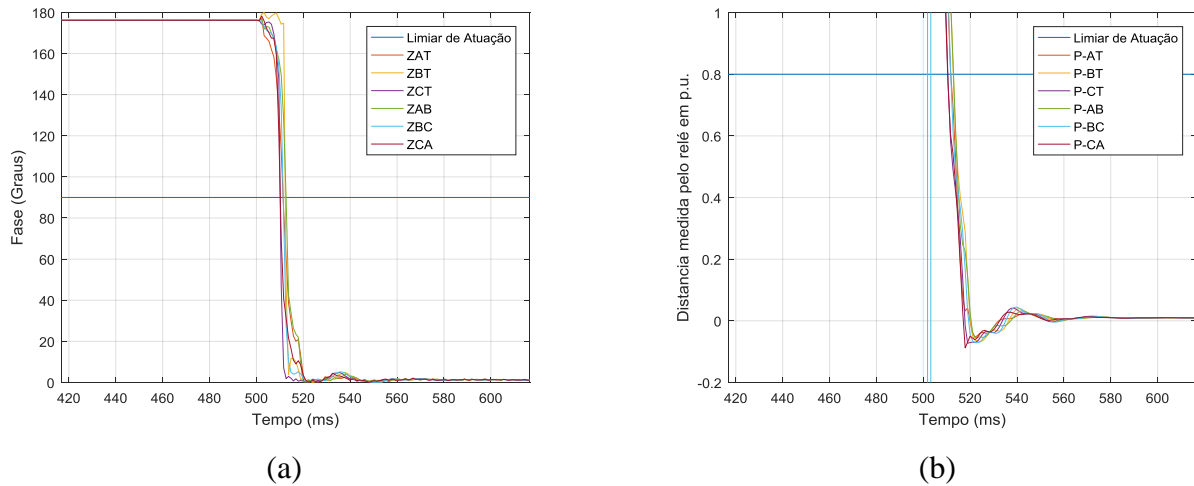


**Figura 4.3.** Saída do comparador de fase autopolarizado durante falta trifásica em 1% da linha protegida.

Nota-se na simulação presente na Figura 4.3, uma ligeira perturbação na saída do comparador de fase autopolarizado instantes após a incidência da falta. Isso se deve ao fato dos níveis de tensão medidos pelo relé serem muito baixos, acarretando em uma severa redução nos valores das impedâncias calculadas, e consequentemente, maior incerteza na determinação da falta.

Na Figura 4.4a, encontra-se a saída do comparador de fase polarizado por memória de tensão de sequência positiva para esse mesmo tipo de falta. Percebe-se que, nesse modelo, tem-se maior confiabilidade na determinação da falta desde o instante de

sua incidência. Apesar da impedância medida pelo relé ter sido afetada tanto quanto no caso do comparador autopolarizado, tem-se que a utilização da polarização por memória de tensão de sequência positiva garante uma expansão da característica mho proporcional a impedância da fonte vista pelo relé, conforme ilustrado na Figura 3.2, que por sua vez passa a contemplar a região da origem do diagrama R-X por tempo suficiente para que se possa identificar corretamente a falta.



**Figura 4.4.** Saída dos comparadores polarizados por memória de tensão de sequência positiva durante falta trifásica em 1% da linha protegida: (a) comparador de fase; (b) comparador proposto por Schweitzer & Roberts.

Devido a essas condições, priorizou-se neste capítulo por investigar o comportamento da característica mho dinâmica para faltas próximas ao terminal do relé. Pois, justamente nessa localidade, a determinação da falta é mais crítica, além de ser onde a característica mho autopolarizada apresenta maior deficiência.

#### 4.4 COMPARADORES IMPLEMENTADOS

Para cada tipo de falta analisada, apresentam-se tanto saídas dos comparadores de fase quanto dos comparadores mho proposto por Schweitzer & Roberts (1993) a fim de se verificar o desempenho da característica mho polarizada por memória de tensão de sequência positiva e autopolarizada. Ambos os comparadores possuem seus princípios de operação detalhados na seção 2.4.

Considerando uma falta trifásica à frente localizada em 1% da linha protegida, tem-se para uma característica mho polarizada por memória de tensão de sequência positiva as saídas dos comparadores presentes na Figura 4.4.

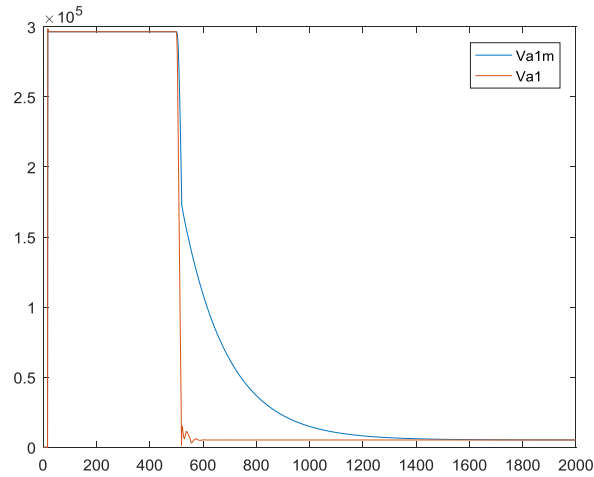
O comparador de fase indica que ocorreu uma falta dentro da linha protegida uma vez que seu valor de fase para uma determinada unidade de impedância cai abaixo do limiar de atuação de  $90^\circ$ . Já o comparador proposto por Schweitzer & Roberts consiste em um mapeamento escalar das impedâncias medidas, dessa forma, se a impedância medida pelo relé estiver compreendida dentro do intervalo que vai desde 0 até 0.8 p.u., significa que a falta ocorreu dentro da primeira zona de proteção, e portanto, a proteção do sistema deve atuar instantaneamente.

A partir da Figura 4.4, constata-se que ambos os comparadores indicam corretamente a existência da falta trifásica à frente do terminal do relé.

#### **4.5 INFLUÊNCIA DO FILTRO DE MEMÓRIA DE TENSÃO**

Conforme discutido anteriormente, o uso do filtro de memória de tensão se faz indispensável para uma correta identificação de faltas trifásicas próximas ao terminal do relé. Uma vez que nessas faltas todas as fases são afetadas, tem-se que os níveis de tensão reduzem consideravelmente, fazendo com que a impedância medida pelo relé se encontre muito próximo à origem do diagrama R-X, gerando incertezas na determinação da falta.

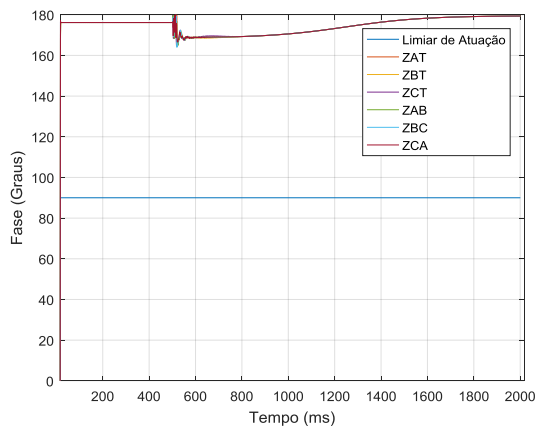
O filtro de memória de tensão permite com que a característica mho dinâmica permaneça em condição de expansão ou contração por mais tempo, permitindo uma melhor identificação da falta. A Figura 4.5, ilustra o efeito do filtro de memória adaptativo, durante uma falta trifásica, na tensão de sequência positiva utilizada na polarização dos comparadores.



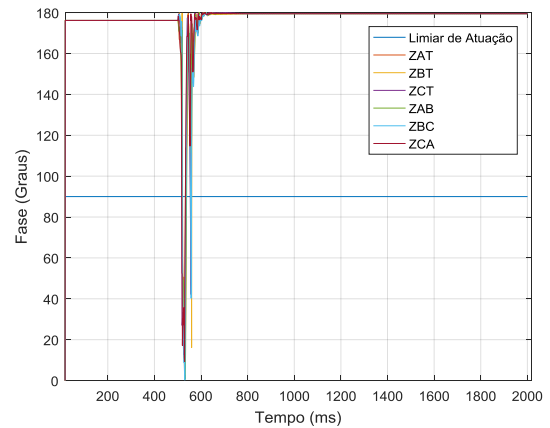
**Figura 4.5.** Efeito do filtro de memória na tensão de sequência positiva durante falta trifásica.

Nota-se que desde a incidência da falta, em 500ms, até o instante em que a tensão de sequência positiva memorizada volta a assumir níveis de tensão próximos ao da própria tensão de sequência positiva, transcorrem-se aproximadamente 1100 milissegundos, sendo esse intervalo de tempo suficiente para permitir uma correta identificação da falta.

A fim de se verificar o efeito prático do uso da memória de tensão, simulou-se uma falta trifásica reversa próxima ao terminal do relé, em 99% da linha de transmissão adjacente, analisando-se as saídas dos comparadores de fase autopolarizado e polarizado por memória de tensão de sequência positiva, conforme indicado na Figura 4.6.



(a)



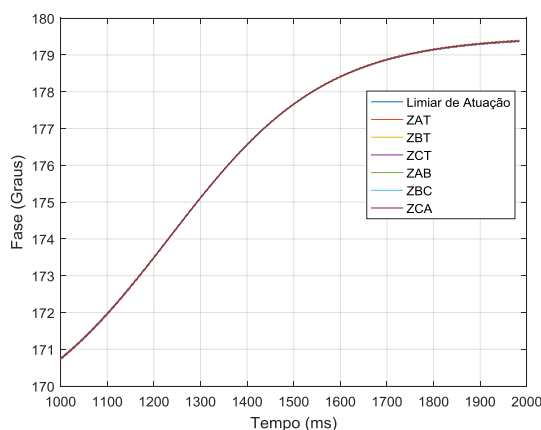
(b)

**Figura 4.6.** Saída dos comparadores de fase durante falta trifásica reversa em 99% da linha de transmissão adjacente: (a) comparador polarizado por memória de tensão de sequência positiva; (b) comparador autopolarizado.

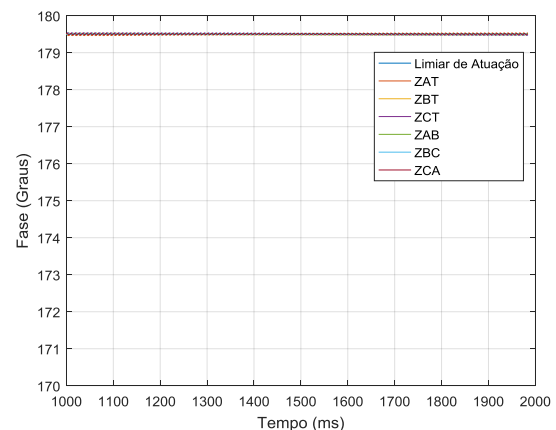
É importante salientar que, para faltas trifásicas, a característica mho dinâmica adquire as dimensões da característica mho autopolarizada na medida em que o efeito do filtro de memória se extingue. O resultado da simulação exibido na Figura 4.6 evidencia o benefício do uso do filtro de memória na tensão de polarização durante a detecção de faltas trifásicas reversas, uma vez que a saída do comparador de fase polarizado não aponta existência de falta na linha protegida em momento algum. Isso se deve ao fato de que por se tratar de uma falta reversa, a característica dinâmica se contrai no instante da falta, conforme ilustrado na Figura 3.6, apenas adquirindo os limites da característica mho autopolarizada depois de transcorrido o efeito da memória.

Já o comparador de fase autopolarizado acusa indevidamente a existência de falta na linha protegida instantes após a incidência da falta na linha adjacente, ao permitir que o argumento do comparador de fase se situe abaixo do limiar de atuação de  $90^\circ$ .

É possível constatar que a característica dinâmica assume de fato as dimensões da característica mho autopolarizada, dado que ambas as saídas dos comparadores indicam um mesmo ângulo de fase em regime permanente de falta, aproximadamente  $179,5^\circ$ , instante em que a memória praticamente se extingue, conforme ilustrado na Figura 4.7.



(a)



(b)

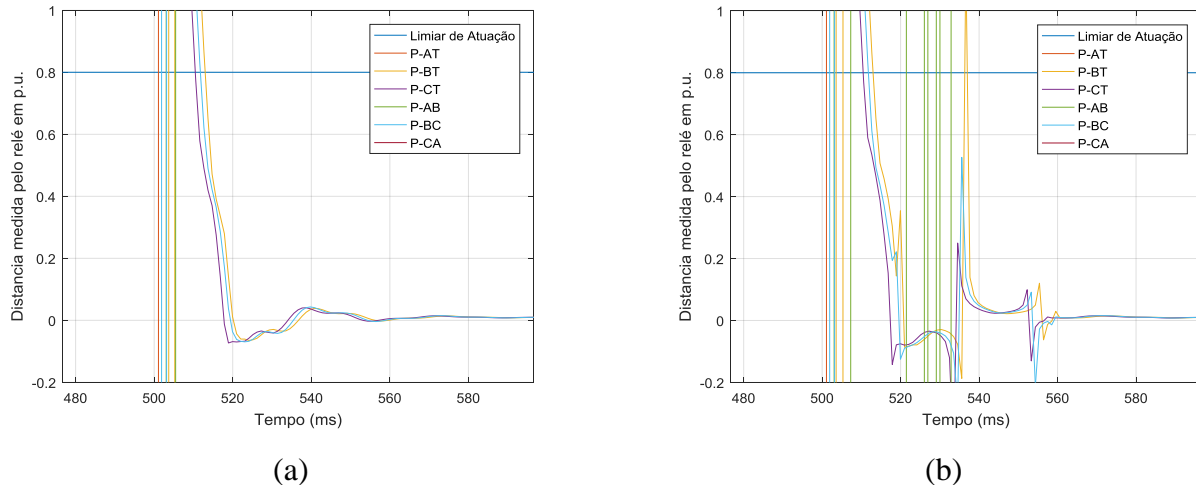
**Figura 4.7.** Saída dos comparadores de fase em regime permanente de falta trifásica reversa, em 99% da linha de transmissão adjacente: (a) comparador polarizado por memória de tensão de sequência positiva; (b) comparador autopolarizado.

## 4.6 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DA CARACTERÍSTICA MHO POLARIZADA POR MEMÓRIA DE SEQUÊNCIA POSITIVA

Conforme demonstrado no capítulo 3, para cada tipo de falta verifica-se uma determinada dinâmica nas características mho polarizadas. Sendo assim, serão avaliados os desempenhos dos comparadores polarizados por memória de tensão de sequência positiva diante dos demais tipos de faltas: bifásica-terra entre as fases B e C, bifásica entre as fases B e C, monofásica na fase A.

### 4.6.1 FALTA BIFÁSICA-TERRA

Aplicando-se uma falta bifásica-terra BCT em 1% da linha protegida obtém-se as saídas dos comparadores indicadas na Figura 4.8. Optou-se por analisar o desempenho das duas características, polarizada e autopolarizada, através da saída do comparador proposto por Schweitzer & Roberts (1993).



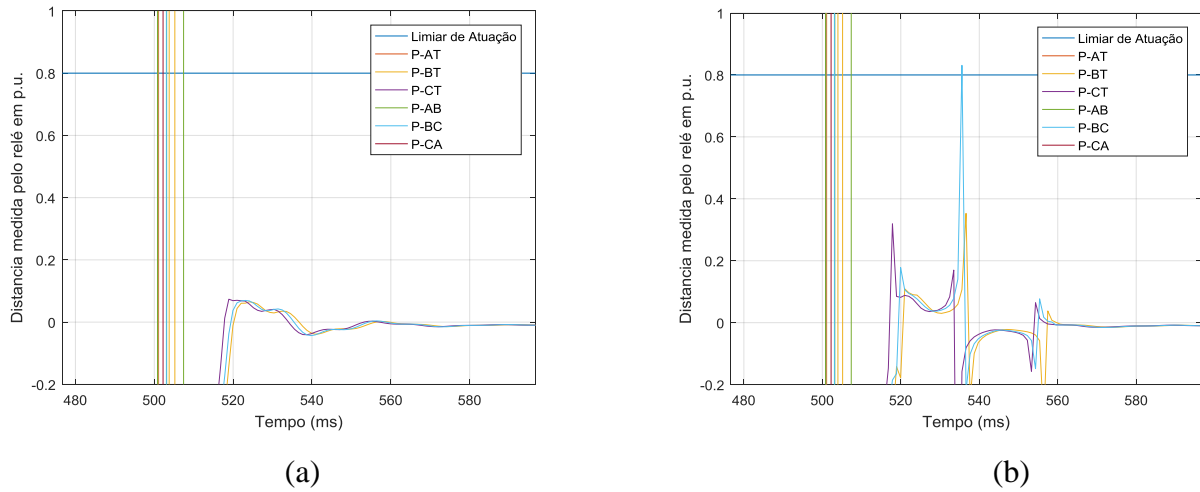
**Figura 4.8.** Saída dos comparadores propostos por Schweitzer & Roberts durante uma falta bifásica-terra BCT em 1% da linha protegida: (a) detalhe da região de operação do comparador polarizado; (b) detalhe da região de operação do comparador autopolarizado.

Ambos os comparadores indicam corretamente uma redução nos valores das unidades de impedância afetadas pela falta, sendo elas:  $Z_{BC}$ ,  $Z_{BT}$  e  $Z_{CT}$ . Entretanto, é notória a melhora de desempenho na detecção de falta no modelo da característica polarizada por memória de tensão de sequência positiva quando comparado à

característica autopolarizada. Principalmente em razão de que o comparador autopolarizado, ilustrado na Figura 4.8b, apresenta significativas imprecisões em sua saída, entre a incidência da falta, em 500 ms, e o instante 560 milisegundos, retardando a devida atuação do relé.

Ainda com relação aos resultados exibidos na Figura 4.8, é importante destacar que, no comparador polarizado por memória de tensão de sequência positiva, durante uma falta bifásica-terra, a característica mantém-se expandida em regime permanente de falta, conforme exposto na Equação 3.11f. Sendo assim, essa característica faz com que as unidades de impedância que assumem valores menores que zero no intervalo de 500 a 520 milisegundos, na Figura 4.8a, estejam dentro do intervalo de operação da proteção de distância.

Supondo agora a ocorrência de uma falta bifásica-terra BCT reversa em 99% da linha de transmissão adjacente, podem-se verificar os resultados mostrados na Figura 4.9.



**Figura 4.9.** Saída dos comparadores propostos por Schweitzer & Roberts durante falta bifásica-terra BCT reversa em 99% da linha de transmissão adjacente: (a) detalhe da região de operação do comparador polarizado; (b) detalhe da região de operação do comparador autopolarizado.

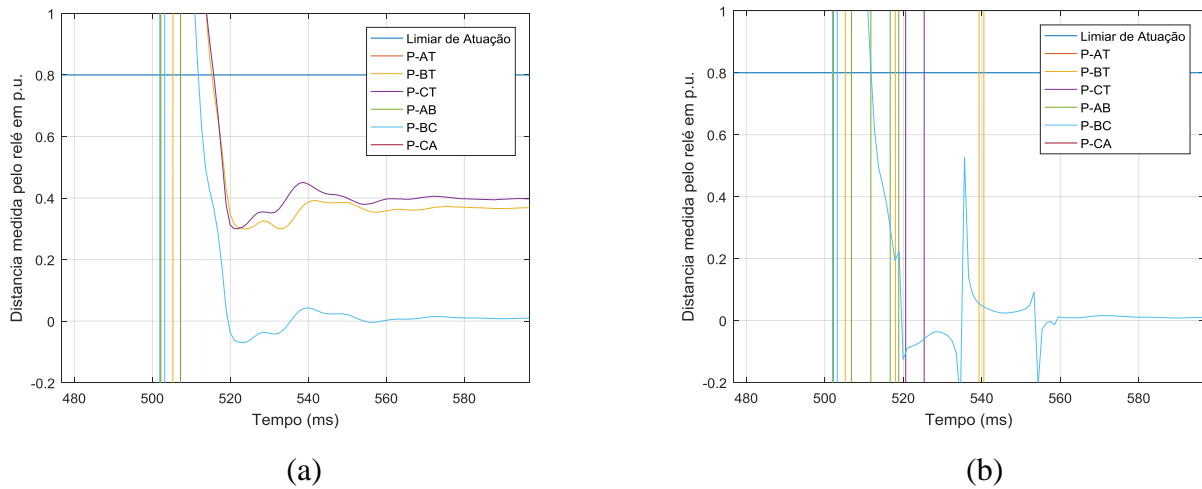
Os resultados exibidos na Figura 4.9 indicam de maneira evidente que o comparador polarizado por memória de tensão de sequência positiva se mostrou mais eficiente e confiável que o comparador autopolarizado, uma vez que o primeiro apresentou um comportamento mais regular nos instantes subsequentes à incidência da falta, em 500 milisegundos. Já o comparador autopolarizado sugere incidência de falta dentro da zona protegida através das unidades  $Z_{BC}$ ,  $Z_{BT}$  e  $Z_{CT}$ , no instante 555 ms, após



a ocorrência do curto-circuito bifásico-terra BCT reverso. Uma vez que os limiares de operação no comparador autopolarizado permanecem inalterados entre 0 e 0.8 p.u., dado que sua característica de operação é estática, pode-se assim, haver atuação indevida do sistema de proteção.

#### 4.6.2 FALTA BIFÁSICA

De maneira análoga às faltas analisadas anteriormente, examinou-se o desempenho da característica mho dinâmica frente à característica autopolarizada considerando-se uma falta bifásica entre as fases B e C em 1% da linha protegida pelo relé. Os resultados obtidos são exibidos na Figura 4.10.

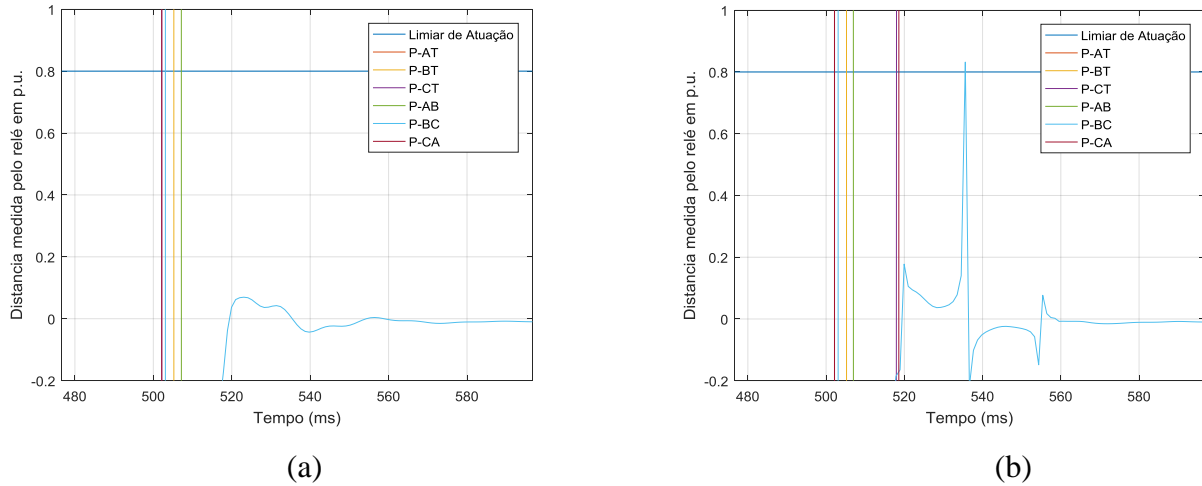


**Figura 4.10.** Saída dos comparadores propostos por Schweitzer & Roberts durante uma falta bifásica BC em 1% da linha protegida: (a) detalhe da região de operação do comparador polarizado; (b) detalhe da região de operação do comparador autopolarizado.

A partir do detalhamento da região de operação de ambos os métodos de polarização, verifica-se que a unidade de impedância  $Z_{BC}$  se consolida acima do zero, sugerindo que de fato houve falta dentro da região protegida. Entretanto, considerando-se as perturbações dentro do intervalo de 55 milissegundos, nos instantes subsequentes a ocorrência da falta, que se dá em 500 ms, no modelo autopolarizado indicado na Figura 4.10b, tem-se que tal imprecisão leva o relé a identificar a falta fora da região protegida nesse período. Fato esse que não se verifica no modelo polarizado por memória de tensão de sequência positiva, pois além da saída do comparador se mostrar mais estável,

de acordo com a Figura 4.10a, a expansão da característica dinâmica proporcionada por esse método de polarização, indicada na Figura 3.8, faz com que o limiar de operação se estenda para abaixo do zero do mapeamento escalar.

Admitindo-se que esse mesmo tipo de falta ocorra em 99% da linha de transmissão adjacente tem-se as seguintes saídas dos comparadores.



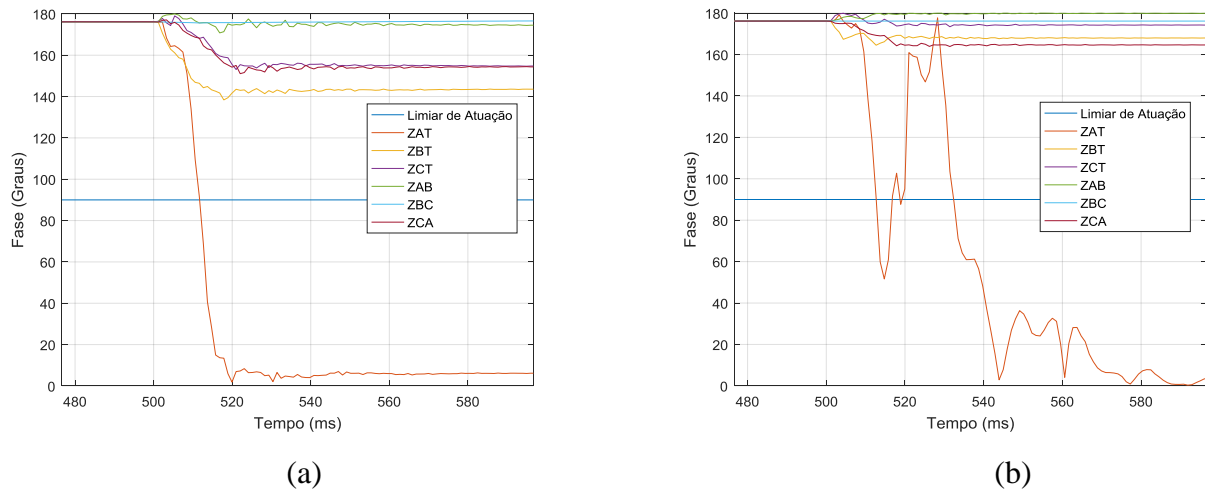
**Figura 4.11.** Saída dos comparadores propostos por Schweitzer & Roberts durante uma falta bifásica BC em 99% da linha adjacente: (a) detalhe da região de operação do comparador polarizado; (b) detalhe da região de operação do comparador autopolarizado.

É possível verificar que na falta reversa também se apresentam perturbações na saída do comparador autopolarizado, referente à unidade de impedância  $Z_{BC}$ , durante os 55 ms subsequentes a incidência da falta bifásica entre as fases B e C. Como se trata de uma falta fora da linha de transmissão protegida, o relé não deve atuar. Entretanto, em 555 ms têm-se imprecisões na saída do comparador autopolarizado, conforme indicado na Figura 4.11b, que podem levar ao relé operar indevidamente.

Com relação à saída do comparador polarizado por memória de tensão de sequência positiva, consegue-se uma resposta mais regular, e por se tratar de uma falta reversa, tem-se uma contração da característica, segundo ilustração da Figura 3.11, que evita que o relé atue indevidamente.

### 4.6.3 FALTA MONOFÁSICA

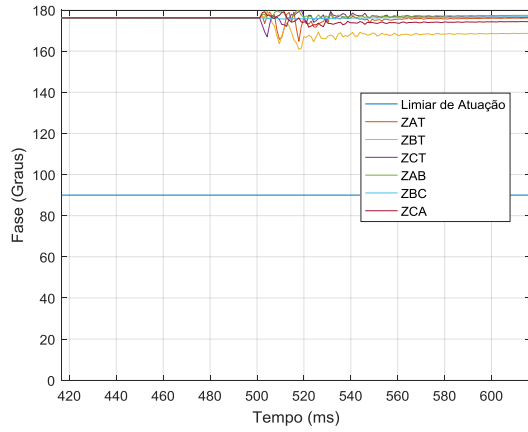
Com relação à incidência de uma falta monofásica na fase A, em 1% da linha protegida, pode-se examinar o benefício da polarização por memória de tensão de sequência positiva por meio das respostas dos comparadores de fase exibidas na Figura 4.12.



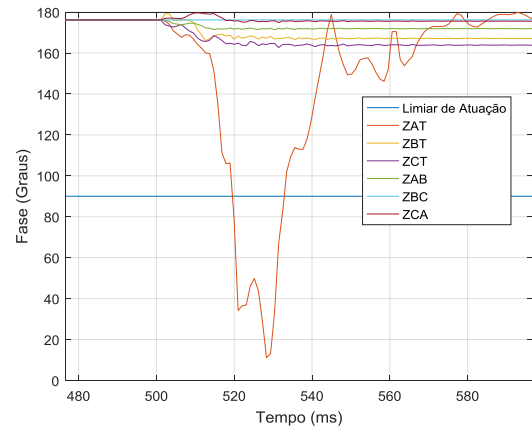
**Figura 4.12.** Saída dos comparadores de fase durante uma falta monofásica AT em 1% da linha protegida: (a) comparador polarizado por memória de tensão de sequência positiva; (b) comparador autopolarizado.

Percebe-se, assim como nos demais tipos de falta analisados, que o comparador polarizado apresenta uma resposta consistente quando contrastado com o comparador autopolarizado, uma vez que a saída do comparador polarizado referente à unidade  $Z_{AT}$  se acomoda mais rapidamente abaixo do limiar de atuação.

O comparador polarizado por memória de tensão de sequência positiva apresentou, similarmente, na curva referente à unidade  $Z_{AT}$ , um comportamento regular para uma falta monofásica na fase A em 99% da linha de transmissão adjacente que permitiu uma correta identificação da falta, conforme indicado na Figura 4.13a. A respeito da saída do comparador autopolarizado, observou-se que após a incidência da falta, o comparador indicou momentaneamente, de maneira incorreta, que a falta ocorreu dentro da linha protegida, segundo exibido na Figura 4.13b.



(a)

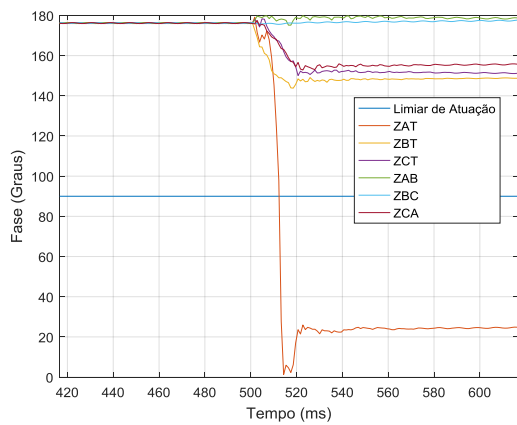


(b)

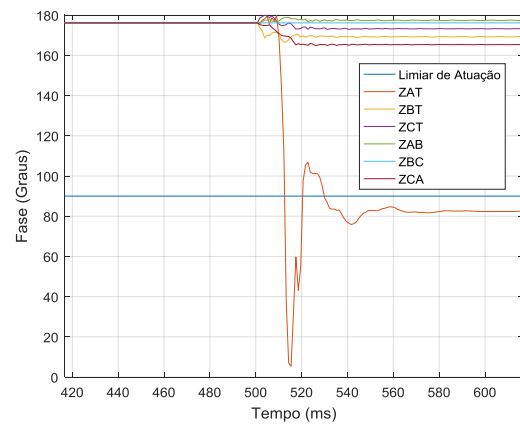
**Figura 4.13.** Saída dos comparadores de fase durante uma falta monofásica AT em 99% da linha adjacente: (a) comparador polarizado por memória de tensão de sequência positiva; (b) comparador autopolarizado.

#### 4.7 AVALIAÇÃO DA ACOMODAÇÃO DE RESISTÊNCIA DE FALTA NAS CARACTERÍSTICAS MHO DINÂMICAS

As deduções analíticas exibidas no capítulo 3 sugerem uma expansão da característica mho polarizada por memória de tensão de sequência positiva diante de faltas à frente do terminal do relé. A fim de se verificar o quanto tal expansão pode beneficiar a acomodação de resistências de falta, serão analisadas as saídas dos comparadores de fase, tanto do modelo polarizado quanto do autopolarizado, para faltas monofásicas na fase A em 2% da linha de transmissão protegida para as seguintes resistências de falta: 10  $\Omega$ , 50  $\Omega$  e 100  $\Omega$ .

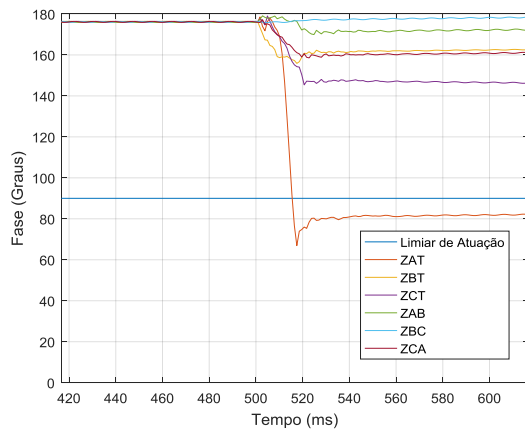


(a)

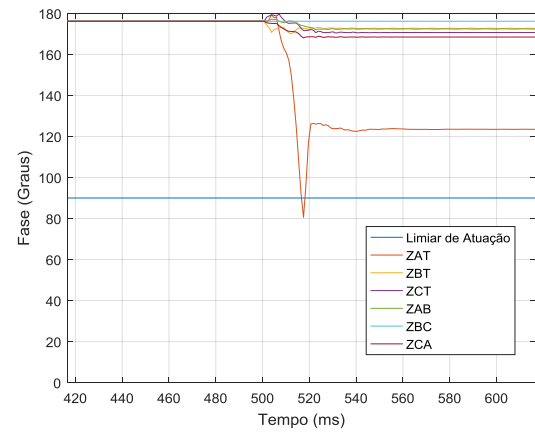


(b)

**Figura 4.14.** Saída dos comparadores de fase durante uma falta monofásica AT em 2% da linha de transmissão protegida com resistência de falta de 10 $\Omega$ : (a) comparador polarizado por memória de tensão de sequência positiva; (b) comparador autopolarizado.

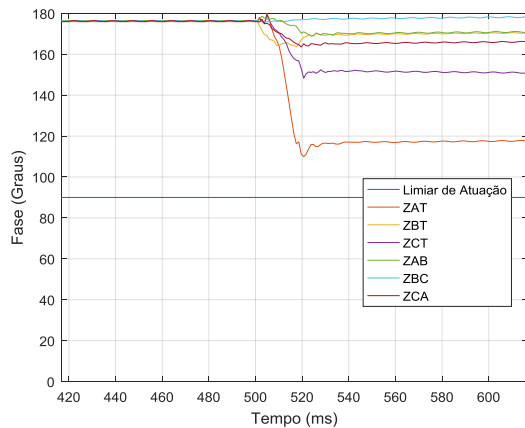


(a)

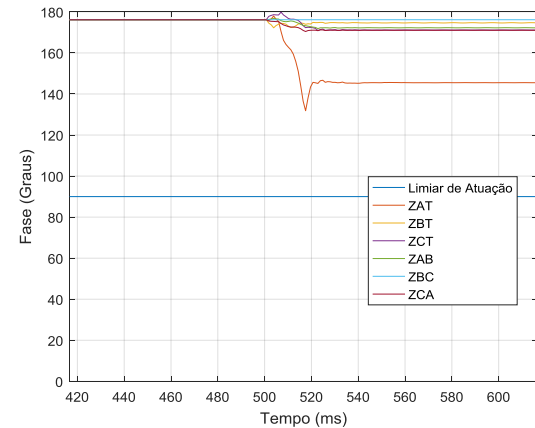


(b)

**Figura 4.15.** Saída dos comparadores de fase durante uma falta monofásica AT em 2% da linha de transmissão protegida com resistência de falta de  $50\Omega$ : (a) comparador polarizado por memória de tensão de sequência positiva; (b) comparador autopolarizado.



(a)



(b)

**Figura 4.16.** Saída dos comparadores de fase durante uma falta monofásica AT em 2% da linha de transmissão protegida com resistência de falta de  $100\Omega$ : (a) comparador polarizado por memória de tensão de sequência positiva; (b) comparador autopolarizado.

Com base nos resultados obtidos para cada um dos valores de resistência de falta, nota-se que a característica mho dinâmica consegue contemplar uma resistência de falta de até aproximadamente  $50\Omega$  sem comprometer a detecção da falta interna a zona protegida. Enquanto que a característica autopolarizada, apenas foi capaz de detectar a falta interna a zona protegida para uma resistência de falta de  $10\Omega$ . Tais resultados sugerem que, de fato, a característica mho polarizada por memória de tensão de sequência positiva apresenta uma dinâmica de expansão para faltas à frente do terminal do relé que permite uma melhor acomodação de resistências de falta.

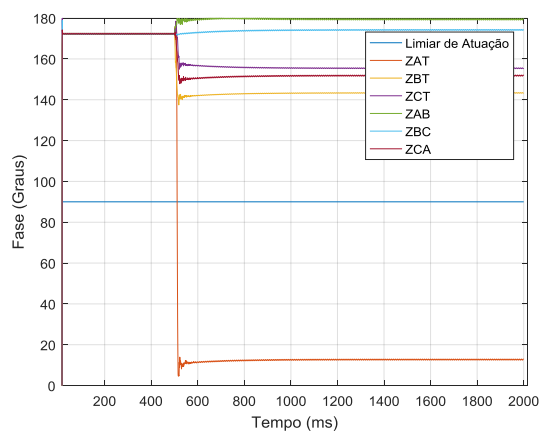
#### 4.8 EFEITOS DA VARIAÇÃO DO FLUXO DE CARGA

No capítulo 3, desconsideram-se os efeitos do fluxo de carga na dinâmica da característica mho polarizada por memória de tensão de sequência positiva. O fluxo de potência proveniente da fonte promove uma queda de tensão de sequência positiva através da impedância da fonte local  $Z_{S1}$ ; desta forma, a tensão de memória de sequência positiva no terminal do relé não é idêntica à tensão da fonte local no instante de incidência da falta. Com isso, a fase da tensão memorizada pode se deslocar, modificando a posição da impedância de polarização  $Z_p$

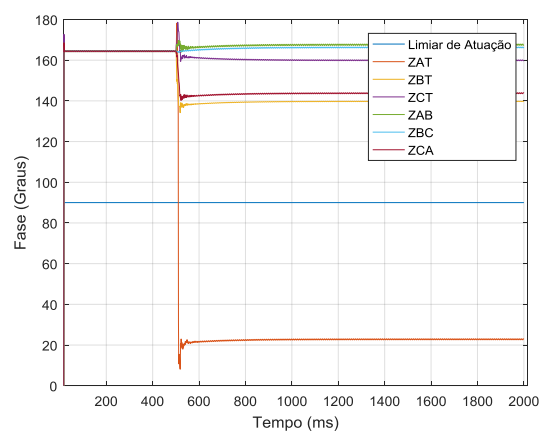
O vetor  $V_{1mem}$ , e consequentemente  $Z_p$ , cada vez mais se atrasa com relação a tensão de falta medida pelo relé a medida que se intensifica o fluxo de carga, dado que se tem um aumento da corrente de pré-falta. Fazendo com que  $Z_p$  desloque a característica mho dinâmica para a esquerda para um fluxo de carga à frente; fluxo de carga reverso apresenta um efeito contrário (FENTIE, 2016).

A seguir serão analisados os efeitos do fluxo de carga na saída de um comparador de fase polarizado por memória de tensão de sequência positiva para uma falta monofásica na fase A em 2% da linha de transmissão a ser protegida.

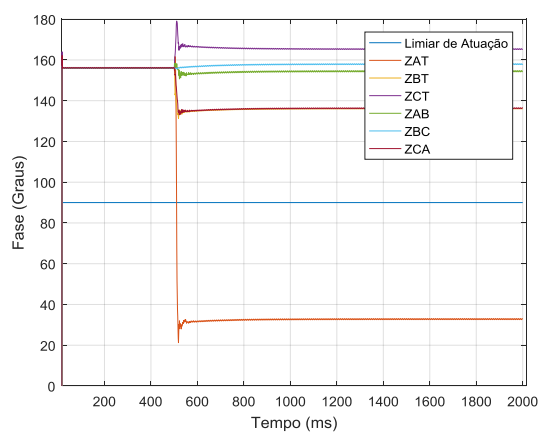
As saídas dos comparadores de fase presentes na Figura 4.17 sugerem que o aumento gradativo do fluxo de carga, durante uma falta monofásica na fase A à frente, provoca um deslocamento à esquerda da característica mho dinâmica de operação do relé. Isso pode ser verificado uma vez que a unidade de impedância  $Z_{AT}$  indica um valor na saída do comparador cada vez maior à medida que se intensifica o fluxo de carga. Por sua vez, um ângulo maior na saída do comparador sugere que a impedância calculada pelo relé se encontra cada vez mais próxima dos limites da característica mho de operação.



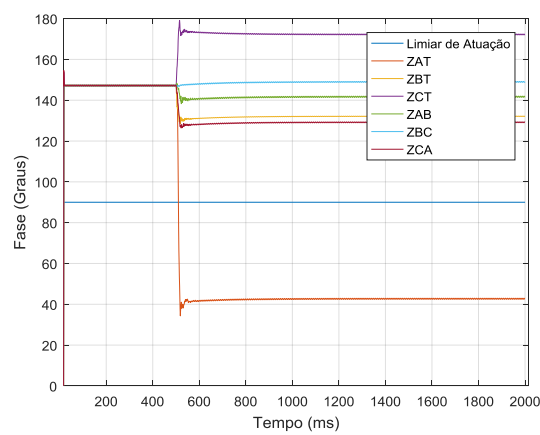
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 4.17.** Saída do comparador de fase polarizado por memória de tensão de sequência positiva durante uma falta monofásica AT em 2% da linha de transmissão protegida para diferentes ângulos de tensão da fonte local: (a) 20°; (b) 40°; (c) 60°; (d) 80°.

## 5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, analisou-se a dinâmica da característica mho polarizada por memória de tensão de sequência positiva e comparou-se seu desempenho frente à característica autopolarizada quando submetidas a diversos tipos de falta.

Primeiramente, apresentaram-se os principais conceitos da proteção de distância de linhas de transmissão, como o cálculo de impedância de falta, o diagrama R-X e as características de operação, as zonas de proteção de distância, os comparadores e as técnicas de polarização na característica mho. De forma que fosse possível compreender o processo empregado nas deduções das características mho dinâmica.

Em seguida, exibiram-se os cálculos referentes à modelagem da expansão da característica mho considerando-se os seguintes tipos possíveis de falta:

- Falta trifásica.
- Falta bifásica envolvendo as fases B e C.
- Falta bifásica-terra envolvendo as fases B e C.
- Falta monofásica envolvendo a fase A.

Em cada uma das faltas supracitadas, investigou-se tanto a incidência de um curto-circuito franco dentro da linha de transmissão protegida (à frente), quanto na linha de transmissão adjacente (reversa). Desse modo, encontraram-se os respectivos vetores de expansão da característica mho dinâmica, referentes às unidades de impedância das fases afetadas pela falta, capazes de descrever o comportamento da característica de operação do relé em regime permanente de falta.

Conforme deduzido no Capítulo 3, as características dinâmicas relativas às unidades de impedância afetadas pela falta se expandem para faltas à frente do relé, melhorando a identificação de faltas internas a zona de proteção, e se contraem para faltas reversas, evitando que o relé atue indevidamente, proporcionando assim, maior segurança à detecção da falta.



Além disso, verificou-se que para faltas à frente, as diversas expressões obtidas dos vetores de expansão deram-se em função da impedância da fonte local  $Z_{S1}$ , enquanto que para faltas reversas, tais vetores de expansão tornaram-se função da impedância de sequência positiva da linha acrescida da impedância da fonte remota, como se a impedância da fonte vista pelo relé fosse  $Z_{L1} + Z_{R1}$ , durante faltas reversas.

Pode-se constatar que as propriedades de expansão da característica mho além de dependerem dos parâmetros da linha e das fontes, também é função das características do filtro de memória, do tipo, da direcionalidade e da localização da falta. Tal característica de operação expandida obtida durante faltas à frente do relé propicia, inclusive, melhor acomodação de resistências de falta.

Por fim, apresentaram-se os resultados obtidos através das simulações, bem como suas respectivas análises. Para isso, fez-se primeiramente uma introdução ao sistema analisado e aos tipos de faltas investigadas. Na sequência, avaliaram-se aspectos da característica mho dinâmica como a influência da localização da falta, os comparadores de fase empregados, a influência do filtro de memória de tensão, além da avaliação de desempenho da característica mho polarizada por memória de tensão de sequência positiva quando confrontada com o modelo de característica autopolarizada diante de diversos tipos de falta.

A partir das respostas obtidas para faltas trifásicas próximas ao terminal do relé, torna-se evidente que o uso da memória de tensão se faz imprescindível para garantir uma referência de tensão confiável que possa ser implementada no comparador de fase, de forma a assegurar uma correta identificação da falta.

Mesmo considerando os demais tipos de faltas próximas ao relé, também foi possível verificar que a saída do comparador polarizado por memória de tensão de sequência positiva apresentou maior velocidade e confiabilidade na identificação da falta.

Como continuação dos estudos realizados neste trabalho, são sugeridas as seguintes propostas de trabalhos futuros:

- Avaliar a influência dos diversos tipos de falta na dinâmica das características mho das unidades de impedância não afetadas pela falta.

- Desenvolver algoritmo de obtenção do vetor de expansão das características mho dinâmicas frente a diversos tipos de faltas.
- Realizar análise gráfica da característica mho polarizada por memória de tensão de sequência positiva sob a influência da variação do fluxo de carga.
- Avaliar a influência da característica dinâmica nos limites de operação do comparador de fase proposto por Schweitzer & Roberts (1993).
- Validar as expressões obtidas por meio de testes específicos, com faltas precisamente ajustadas para identificar os limites das características polarizadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, P. M. *Power System Protection*. Piscataway, New Jersey, EUA: John Wiley & Sons Inc., 1999.

CALERO, F. *Distance Elements: Linking Theory With Testing*. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., Pullman, Washington USA, 2009.

CIGRÉ. *Modern Techniques for protecting and monitoring of transmission lines*. Paris, FR, Tech. Rep., 2011.

COOK, V. *Analysis of Distance Protection*, Research Studies Press. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1985.

ELMORE, W. A. *Protective Relaying: Theory and Applications*. 2. ed. New York, USA: Marcel Dekker Inc., 2003.

FENTIE, D. D. *Understanding the Dynamic Mho Distance Characteristic*. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., Pullman, Washington USA, 2016.

FILHO, J. M.; MAMEDE, D. R. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. Rio de Janeiro, Brasil: LTC, 2014.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Procedimentos de Rede – Submódulo 2.6: Requisitos mínimos para os sistemas de proteção e de telecomunicações*. Brasília, 2011. Disponível em: <http://www.ons.org.br/procedimentos/index.aspx>.

PAITHANKAR, Y. G.; BHIDE, S. R. *Fundamentals of Power System Protection*. New Delhi, India: Prentice-Hall, 2007.

REBIZANT, W. *Digital Signal Processing in Power System Protection and Control*. London, UK: Springer, 2011.

SCHWEITZER, E. O.; ROBERTS, J. *Distance Relay Element Design*. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., Pullman, Washington USA, 1993.

SILVA, K. M. *Estimação de Fasores Baseada na Transformada Wavelet para Uso na Proteção de Distância de Linhas de Transmissão*. 203 f. Tese (Doutorado em

Engenharia Elétrica) – Universidade de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, abr. 2009.

SILVA, K. M. *Implementação da Função de proteção de Distância Utilizando Comparadores do Tipo Cosseno*. Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil, 2016. Notas de aula.

ZIEGLER, G. *Numerical Distance Protection: Principles and Applications*; 2. ed. Berlin, Germany: Siemens, AG, 2006.